

Qualification du domaine de soudabilité en soudage par friction malaxage

Doctorant :
Nejah JEMAL

Directeur de thèse :

Franck GIROT (AMPT Bordeaux)

Encadrants :

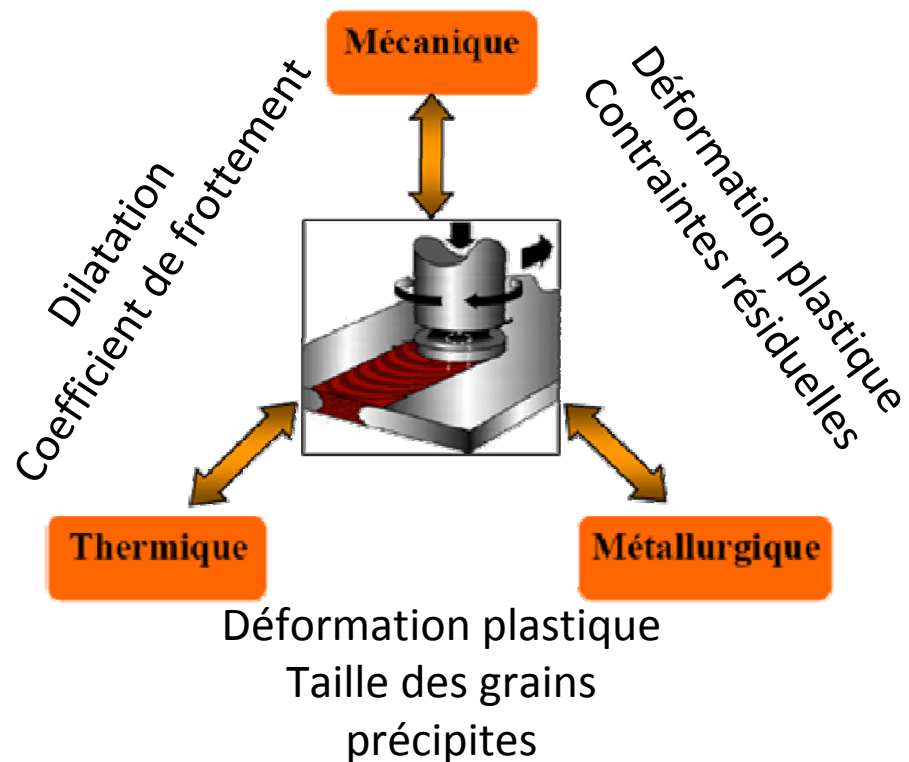
Laurent LANGLOIS (AMPT Metz)

Jean Eric MASSE (AMPT Aix-en-Provence)

Contexte

Problématique

- Influence des paramètres du procédé sur la qualité du cordon
- Compréhension des interactions et phénomènes physiques lors du soudage FSW

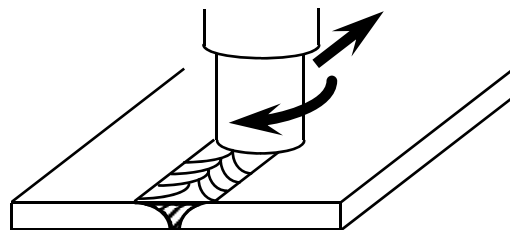


Contexte

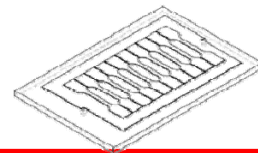
Objectif général

Contribuer à la compréhension des interactions outil/matière pour déterminer l'influence des paramètres opératoires sur la qualité du cordon FSW :

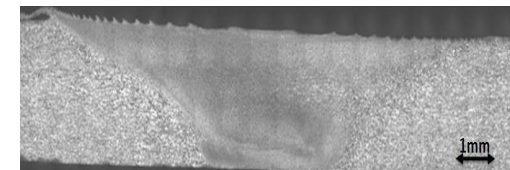
- Une démarche directe d'analyse les liens directes entre le procédé et le cordon (caractérisation)
- Une étude plus fine des aspects physiques



PROCÉDÉ FSW



Etude directe



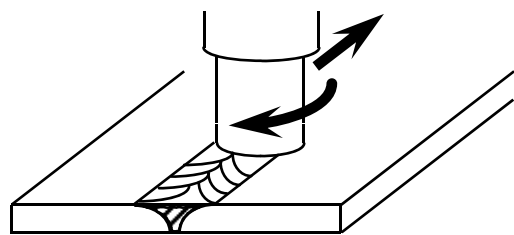
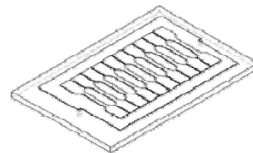
PRODUIT

Contexte

Objectif général

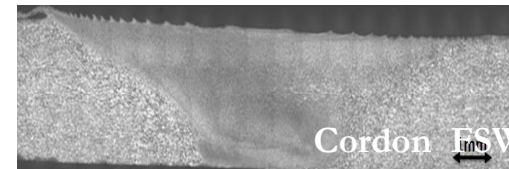
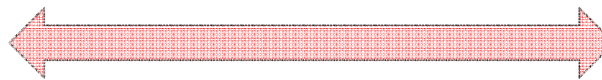
Contribuer à la compréhension des interactions outil/matière pour déterminer l'influence des paramètres opératoires sur la qualité du cordon FSW :

- Une démarche directe d'analyse des liens directs entre le procédé et le cordon (caractérisation)
- Une étude plus fine des aspects physiques

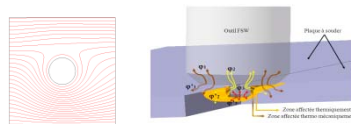


PROCÉDÉ FSW

Etude directe



PRODUIT



Aspects physiques



PLAN DE LA PRÉSENTATION

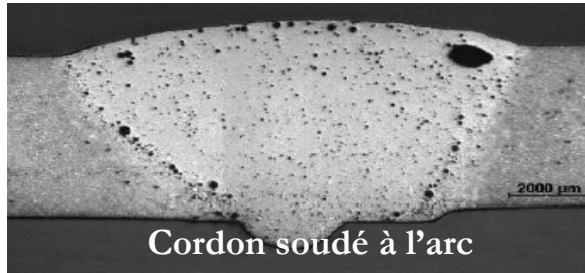
Introduction

Interaction direct procédé/produit

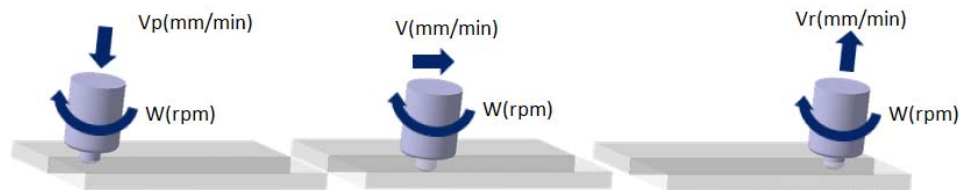
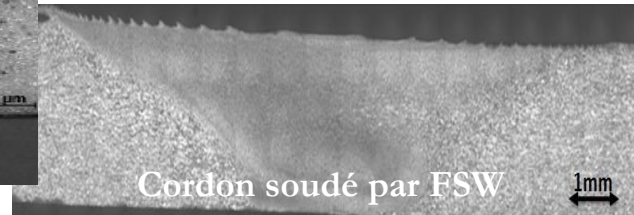
Ecoulement de la matière

Approche thermique

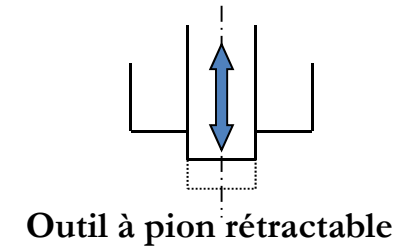
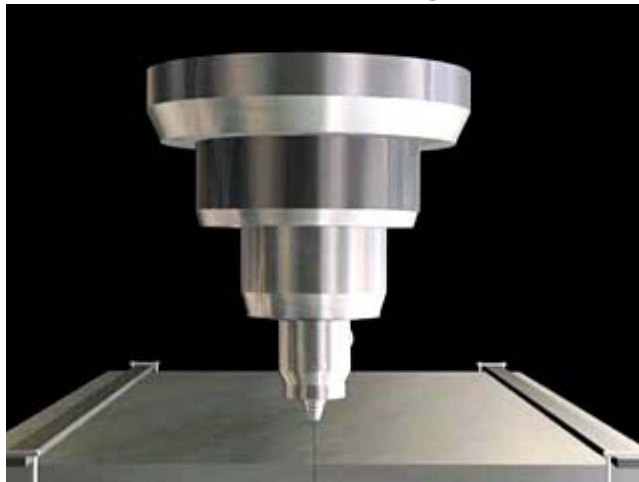
Conclusions et perspectives



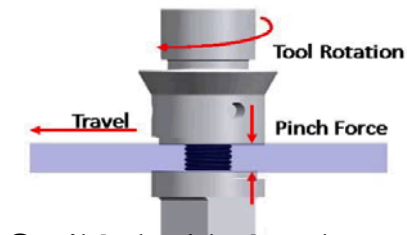
$T_s < T_f$



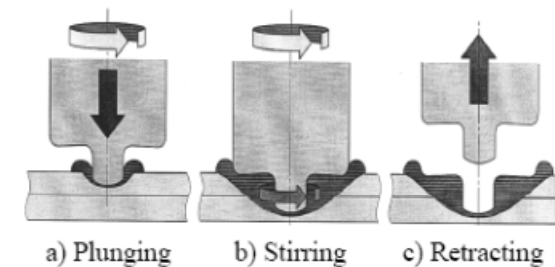
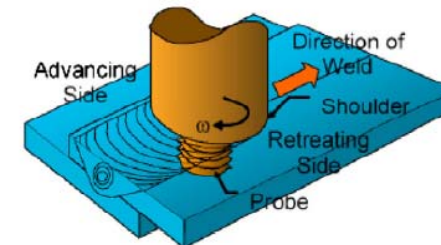
Phases de soudage



Outil à pion rétractable



Outil à double épaulement



[*] J. Schneider, A. Nunes, M.. 8th International Symposium on Friction Stir Welding, Germany.

Paramètres opératoires

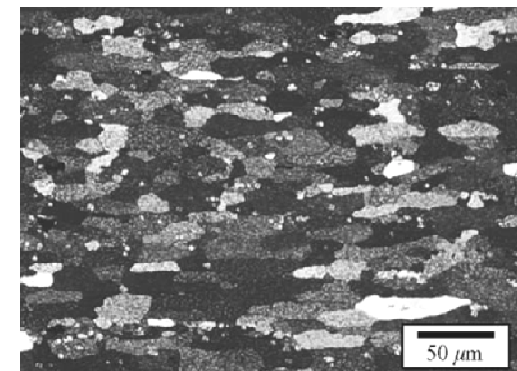
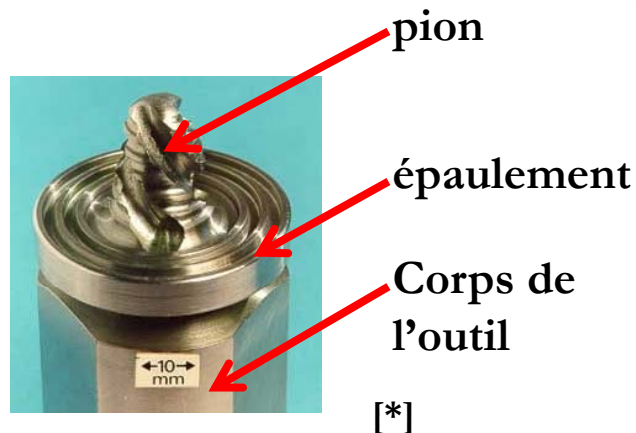
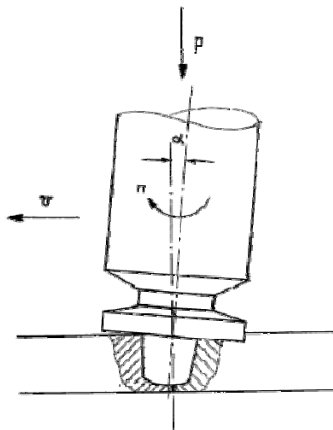
- Vitesse de rotation.
- Vitesse d'avance.
- Effort sur l'outil.
- Angle d'inclinaison

Paramètres OUTIL

- Géométrie du pion
- Géométrie de l'épaulement
- Matériaux
- Revêtement
-

Paramètres environnementaux

- Épaisseurs des pièces
- Nuance des matériaux
- Nature de l'assemblage (même matériaux ou pas)
- Caractéristiques chimique et physique des matériaux



[*] Tool technology - the heart of friction stir welding. <http://www.twi.co.uk/content/c1073a.html>

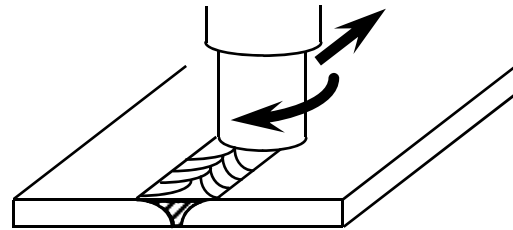
Intérêts:

- 👍 Assemblages de haute qualité ayant une bonne structure métallurgique.
- 👍 Pas de métal d'apport (gain en masse)
- 👍 Peu de déformations après soudage.
- 👍 Excellente répétabilité, très bonne reproductibilité et possibilités d'automatisation.

Applications:

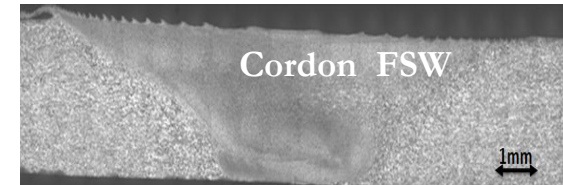


[Eclipse aft fuselage weld.avi](#)



PROCÉDÉ FSW

Etude directe

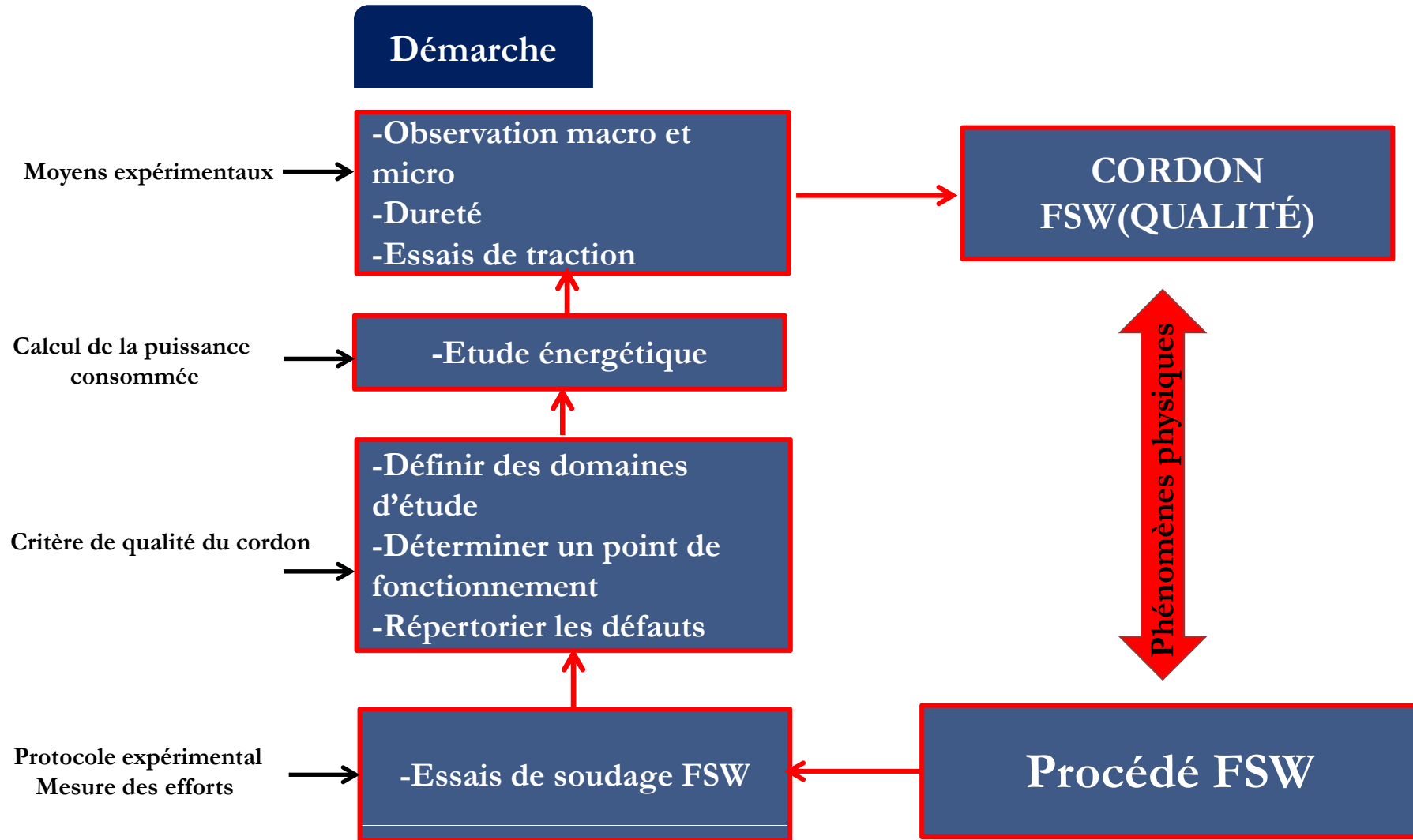


PRODUIT

I-INTERACTION PARAMÈTRE PROCÉDÉ/PRODUIT

Objectifs

Etudier les liens directs entre les paramètres du procédé et la qualité du cordon



Présentation de l'Alliage étudié

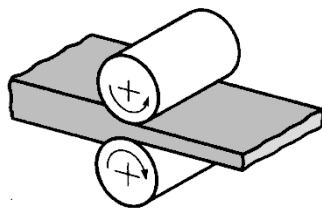
2024-T3 ; ISO AlCu4Mg1; NF A-U4G1

T3: traitement thermique

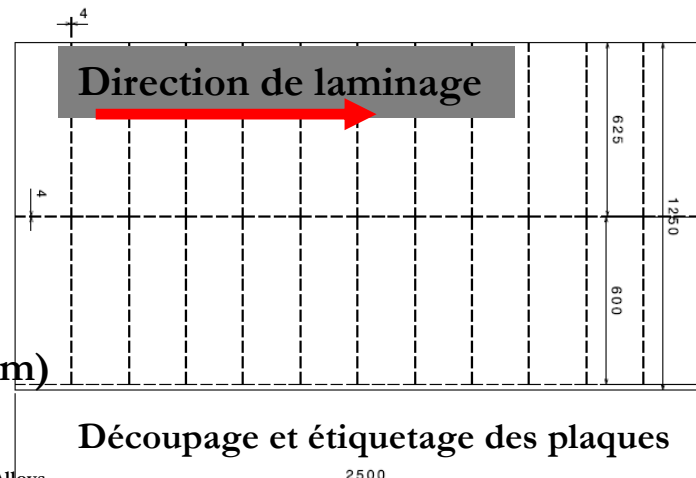
- Mise en solution
- Trempe
- Maturation

- Alliage d'aluminium à durcissement structural

Applications : aéronautique ...

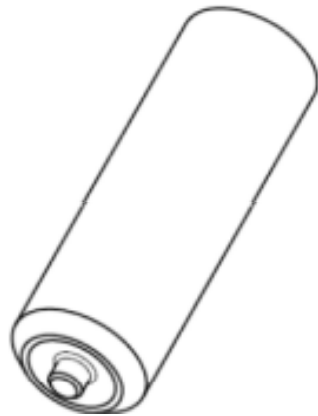


Etat de livraison: plaques laminées (3 mm)

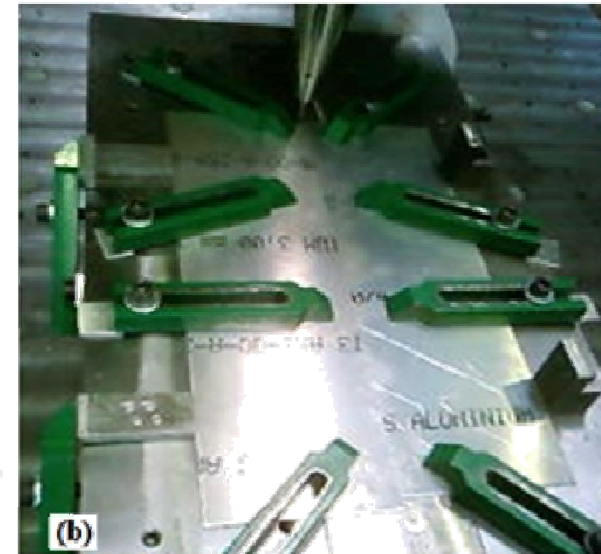
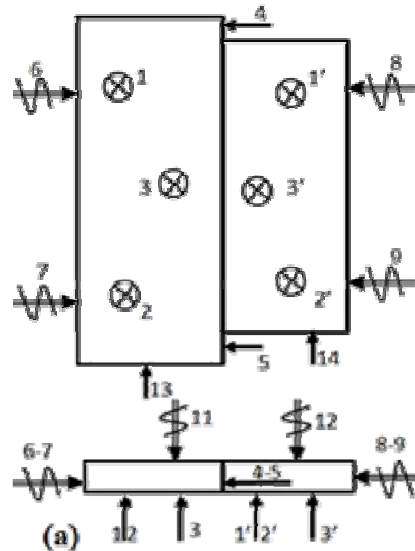


Outillages

1

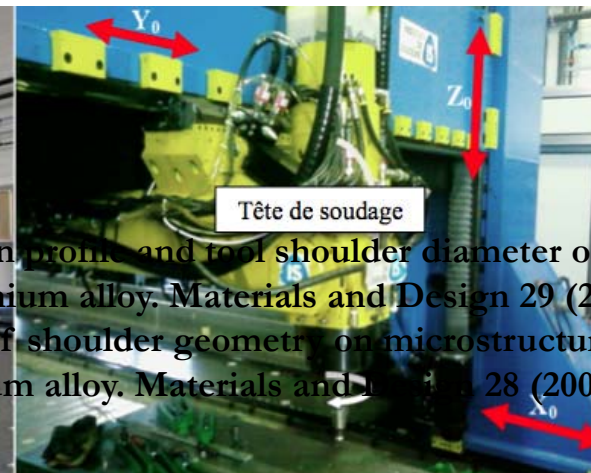
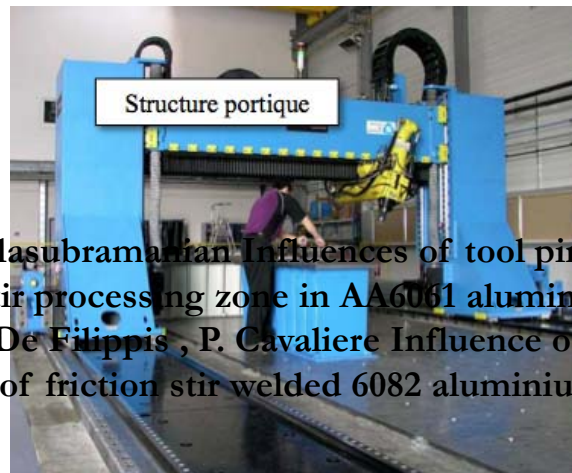


Conception de l'outil FSW





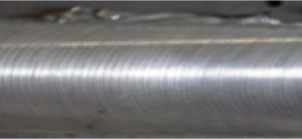



Montage de bridage

Machine



[*] K. Elangovan, V. Balasubramanian Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy. Materials and Design 29 (2008)
 [**] A. Scialpi, L.A.C. De Filippis, P. Cavaliere Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy. Materials and Design 28 (2007)

Différents défauts en FSW

Brulure	Ecaillage	Bavure
		
Tunnel apparent	Tunnel au cœur	Manque de pénétration
		

Elimination des défauts

- Les brulures : apport de chaleur excessif de l'outil inapproprié à l'épaisseur de la tôle.
- Tunnel : modifier la géométrie de l'outil augmenter l'effort de soudage, modifier l'inclinaison de l'outil.
- Film d'oxyde : décapage mécanique ou chimique.

Essais acceptables

pour calcul énergétique

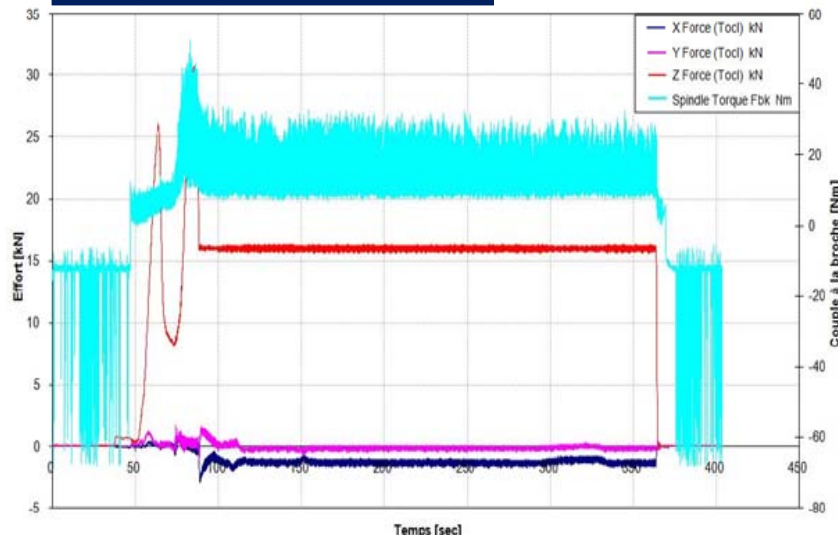
N(tr/min)	Va(mm/min)	F(KN)
350	100	15
480	100	15
300	120	15
350	120	15
350	100	15
400	120	15
430	120	15
350	150	15
800	300	15
1000	300	15
800	350	15
1100	350	15
1200	350	15
1500	350	15
1200	400	15

Domaine de soudabilité

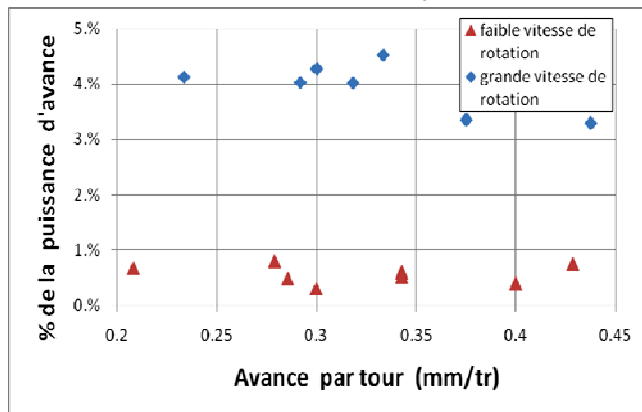
pour étude paramétrique

N(tr/min)	Va(mm/min)	F(KN)
350	120	15
350	100	15
350	150	15
300	120	15
400	120	15
350	120	14
350	120	16

Mesures et Calculs



Exemple des mesures Fx Fy Fz et Mz



Puissance mécanique

$$P = C_z \cdot \omega_z + F_x \cdot V_a$$

Energie nominale

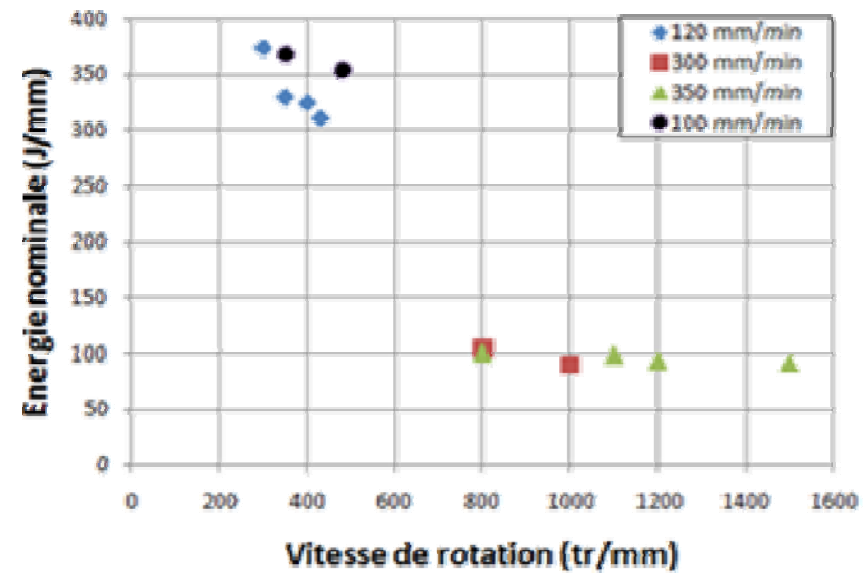
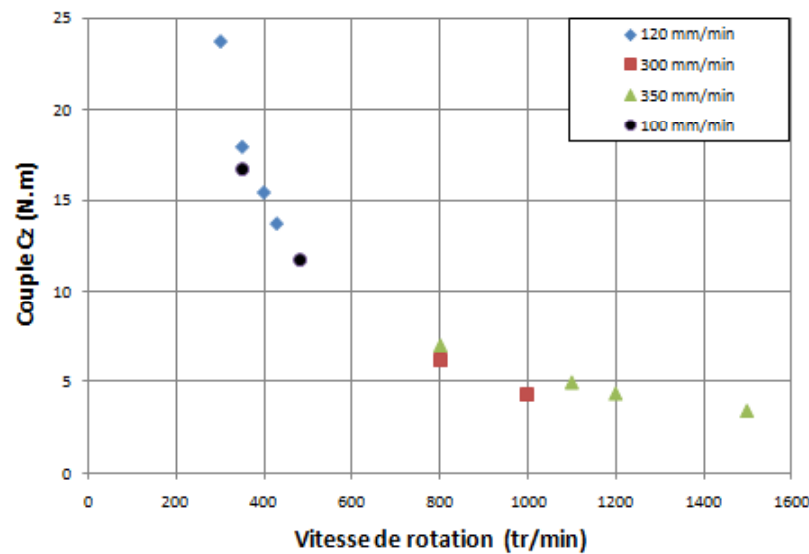
$$P = \frac{C_z \cdot \omega_z}{V_a}$$

la vitesse d'avance a plus d'impact sur la puissance pour les grandes vitesses de rotation

[*] A. Simar. A multiscale multiphysics investigation of aluminum friction stir welds from thermal modelling to mechanical properties through precipitation evolution and hardening. PhD thesis, Université Catholique de Louvain, 2006.

Résultats

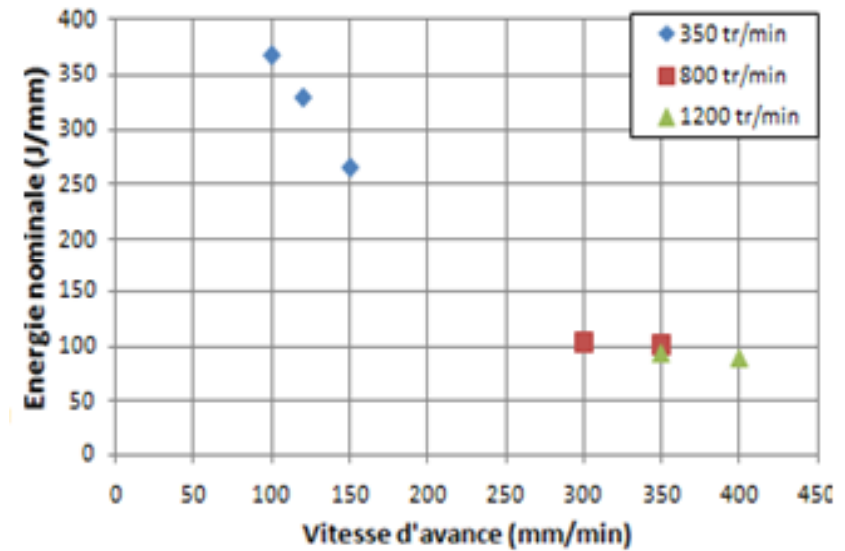
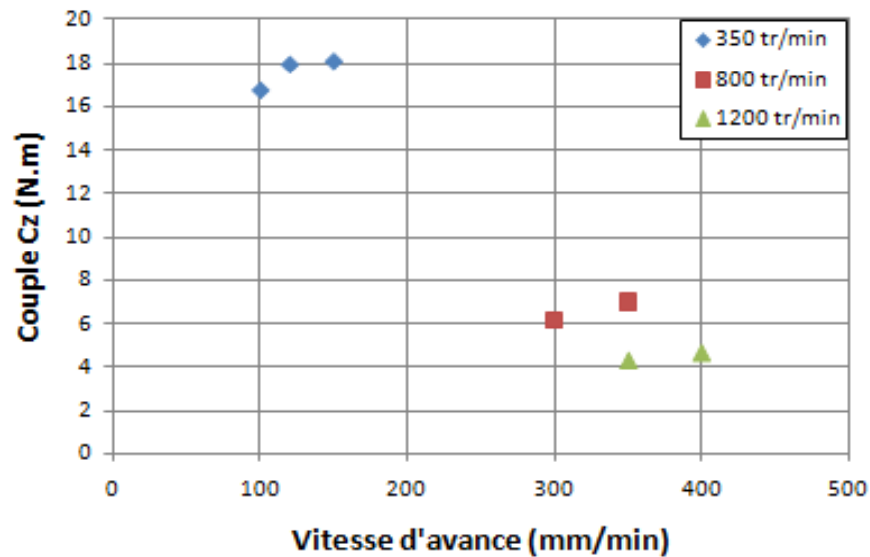
Influence de la vitesse de rotation



→ Le couple est fortement lié à la vitesse de rotation

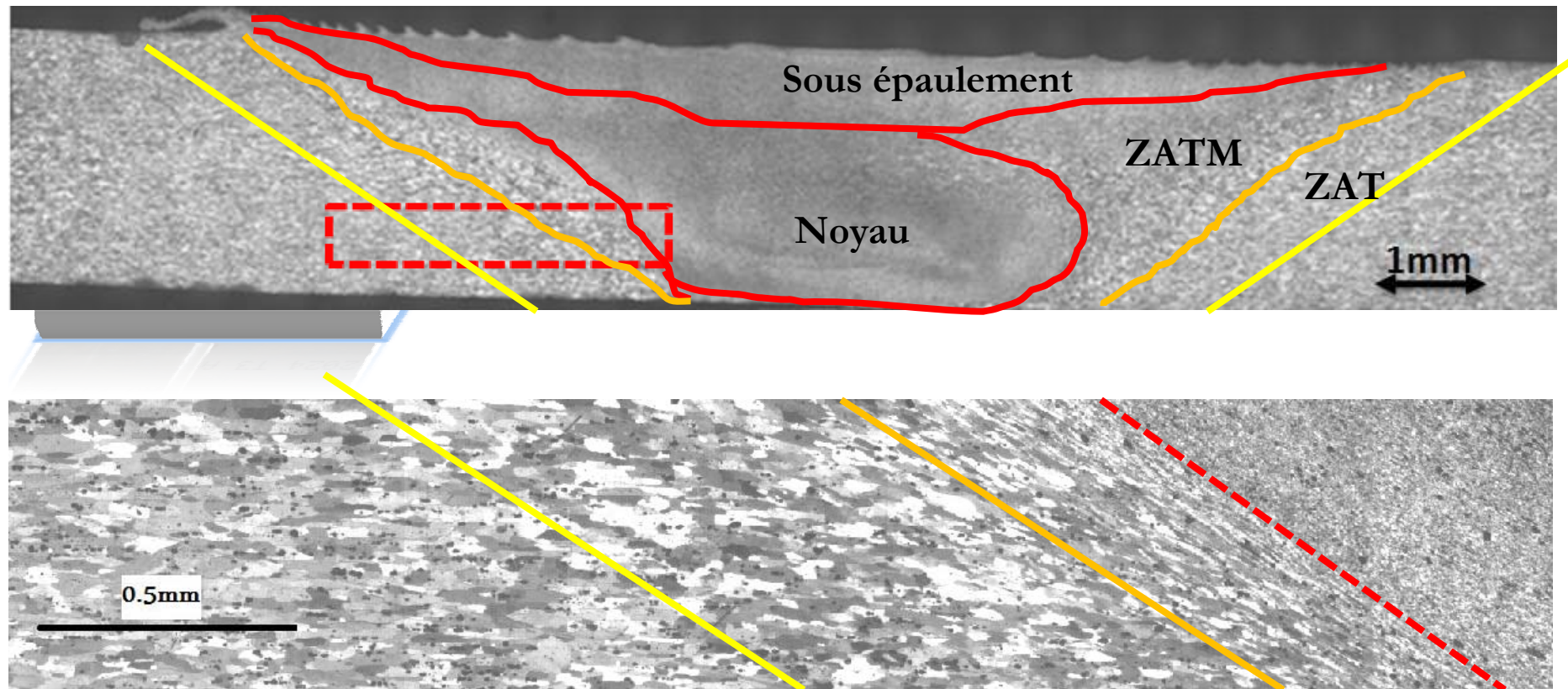
Résultats

Influence de la vitesse d'avance



→ Une élévation de la vitesse d'avance engendre une augmentation du couple résistant au niveau de l'outil

Morphologie et zones du cordon



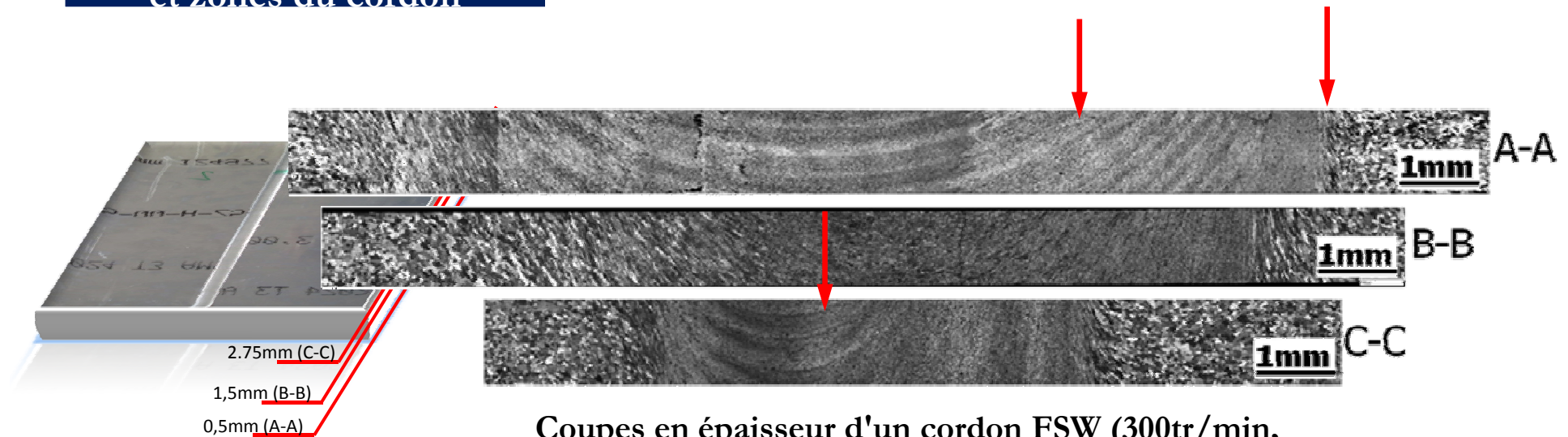
intact

Grossissement

déformation

Affinement

Morphologie et zones du cordon

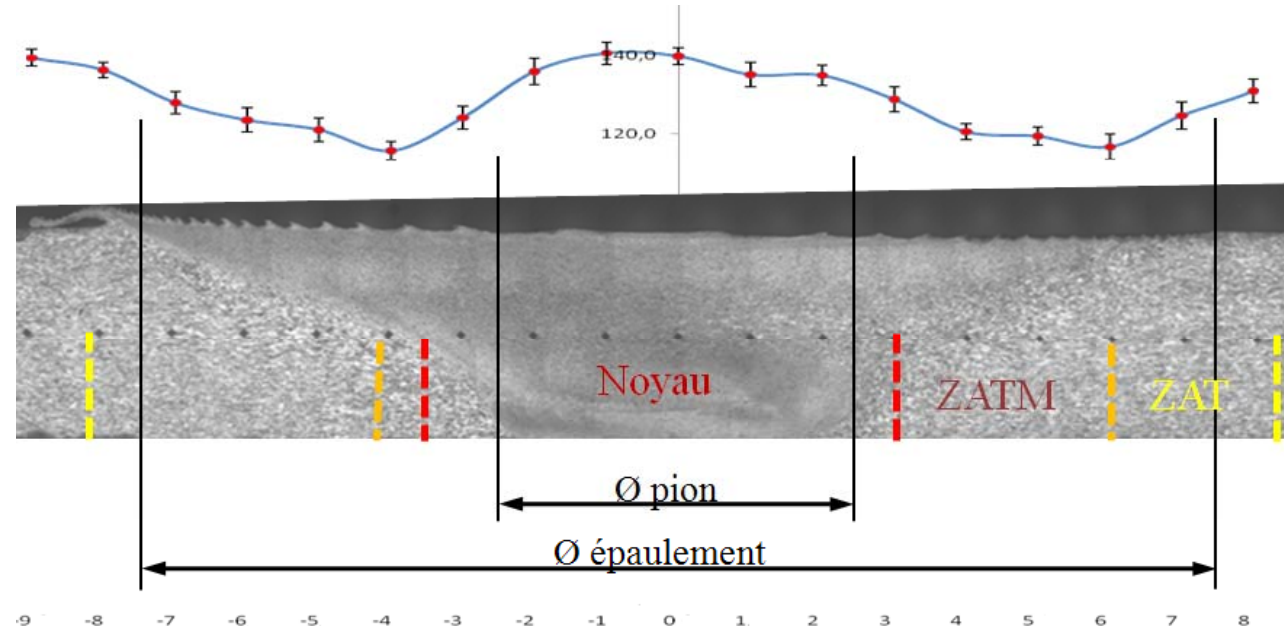


Coupes en épaisseur d'un cordon FSW (300tr/min,
 $V_a=100\text{mm/min}$; $F=15\text{N}$)

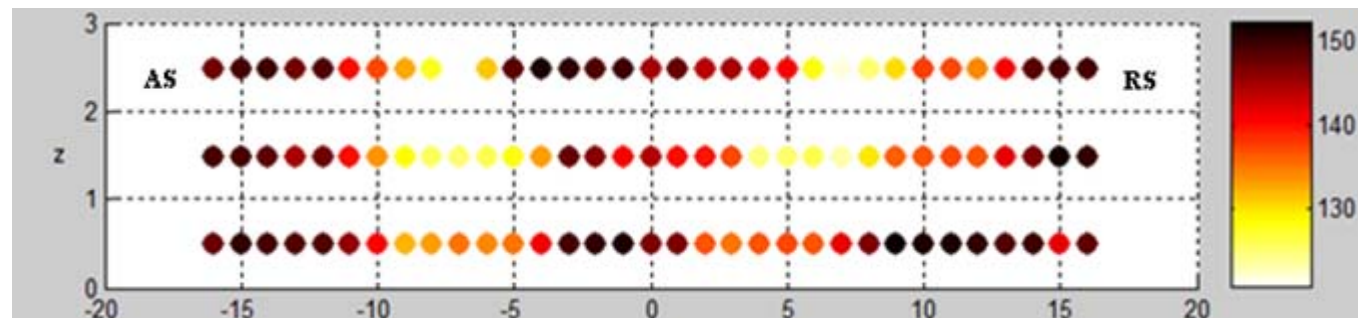
- Morphologie des grains est gouvernée par la déformation
- La Frontière ZATM/Noyau est plus nette du coté avance
- Stries au pied du cordon (interaction outil/matière)

Dureté : Vickers

- Charge: 1 kg
- Vitesse de pénétration: 50 $\mu\text{m/s}$
- Temps de maintien: 15 secondes



Filiation de la dureté d'un cordon FSW ($N=320$ tr/min, $V_a=120$ mm/min, $F_z=15$ kN)



→ Dureté liée à la taille des grains ainsi qu'à l'arrangement et à la taille des précipités

→ Effet de la température et de la déformation des grains

Essais de traction

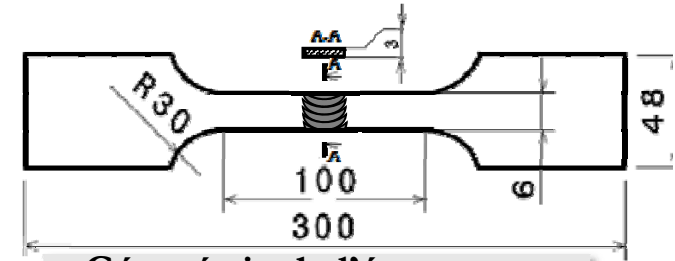


Vitesse=2mm/min

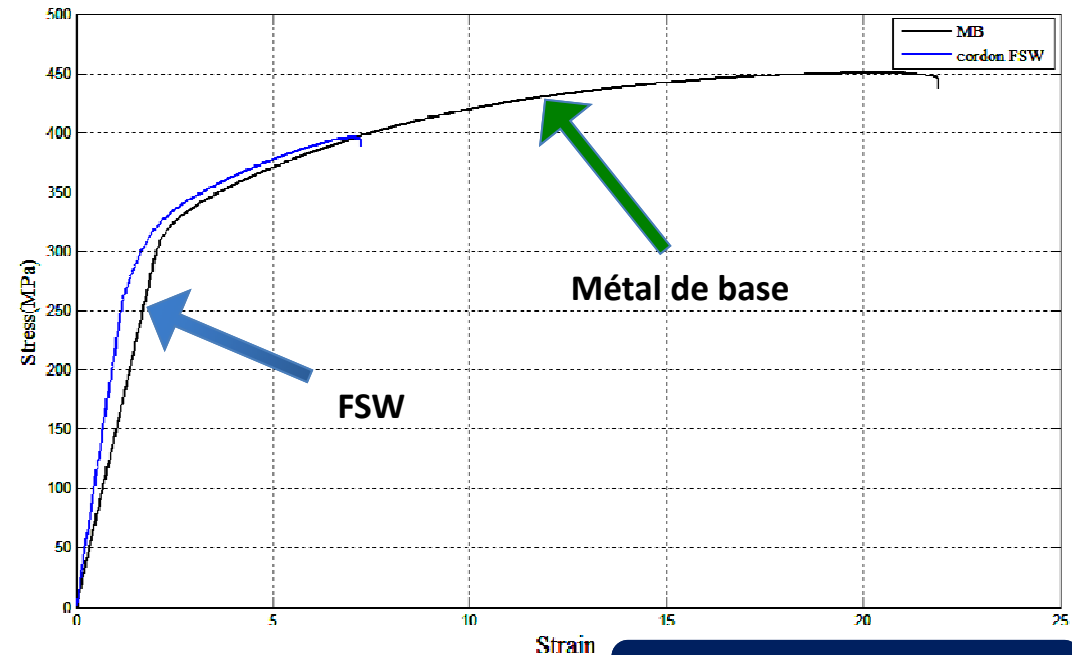
Machine de Traction

Étude paramétrique

N(tr/min)	Va(mm/m in)	F(KN)
350	120	15
350	100	15
350	150	15
300	120	15
400	120	15
350	120	14
350	120	16

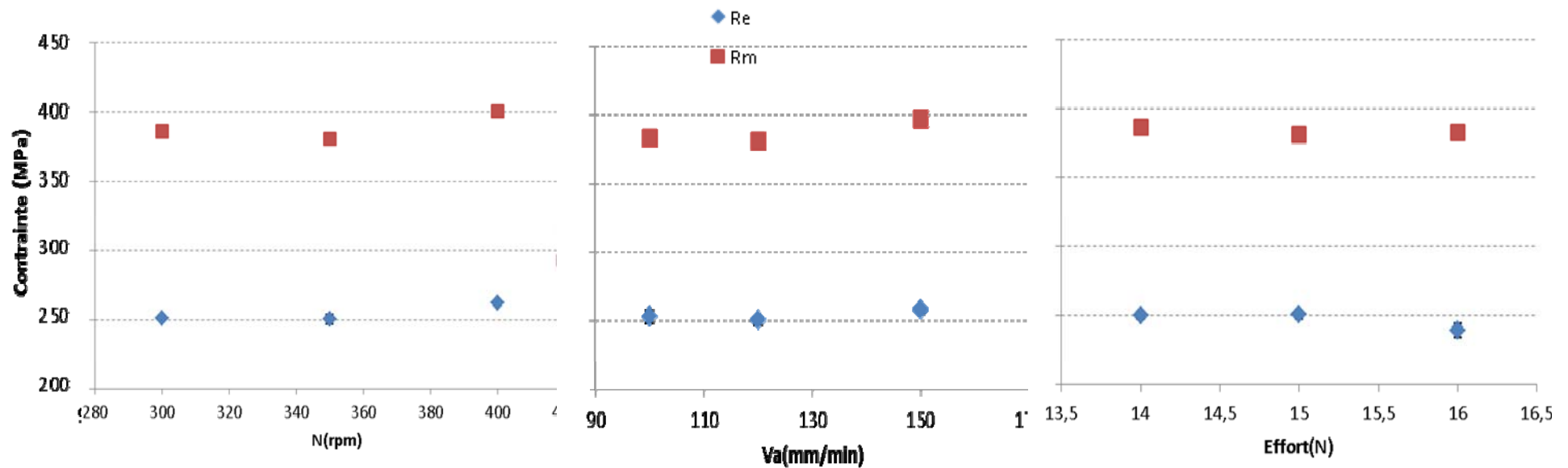


Géométrie de l'éprouvette
 normalisée de traction :
 comportement transversale
 du cordon



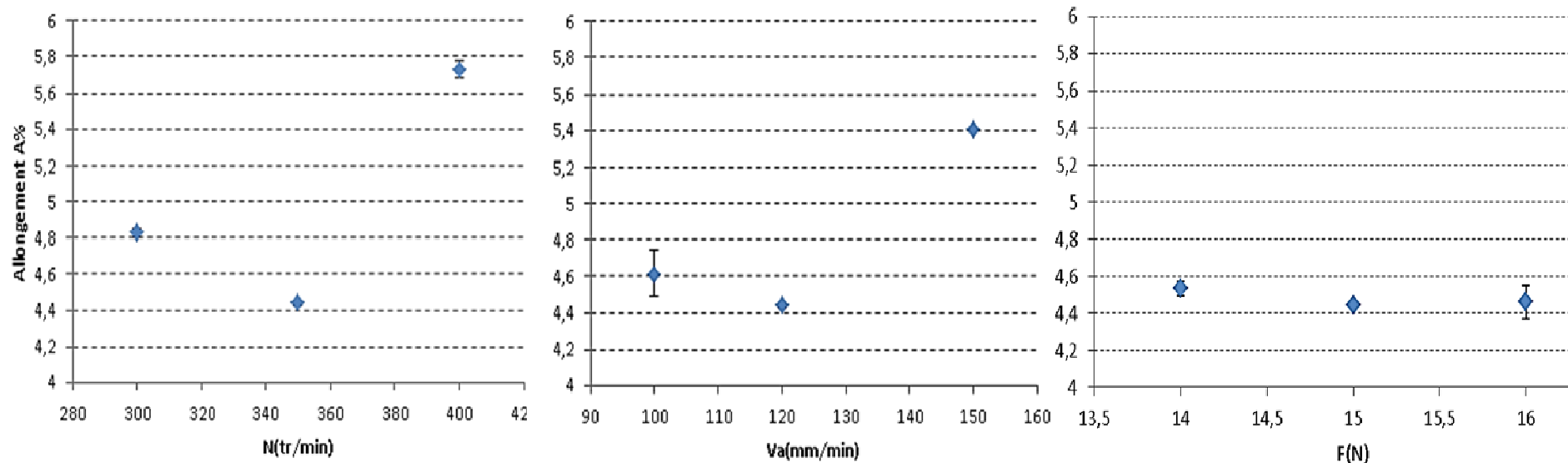
Exemple de résultats

Influence des paramètres opératoires sur la tenue mécanique: limite d'élasticité et la résistance à la traction



→ Peu d'influence sur la limite d'élasticité et la résistance à la traction

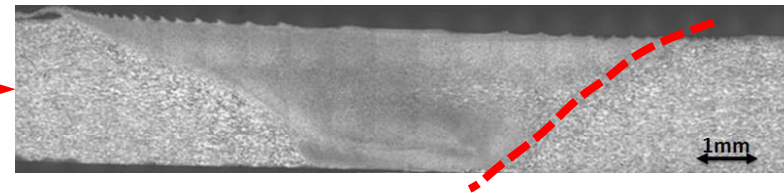
Influence des paramètres opératoires sur la tenue mécanique: A%



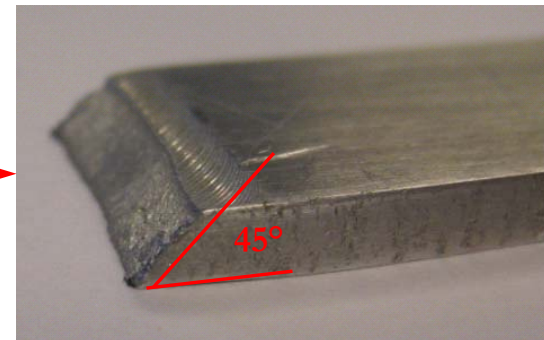
→ Les vitesses ont plus d'influence sur A%

→ Effort n'influe que légèrement sur l'allongement

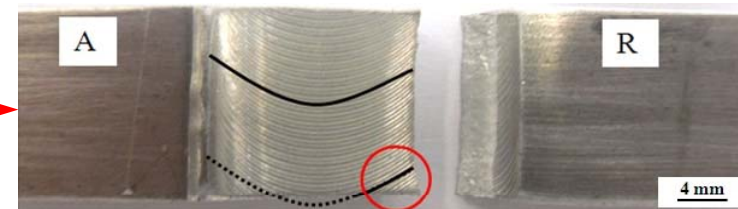
→ Domaine d'étude restreint



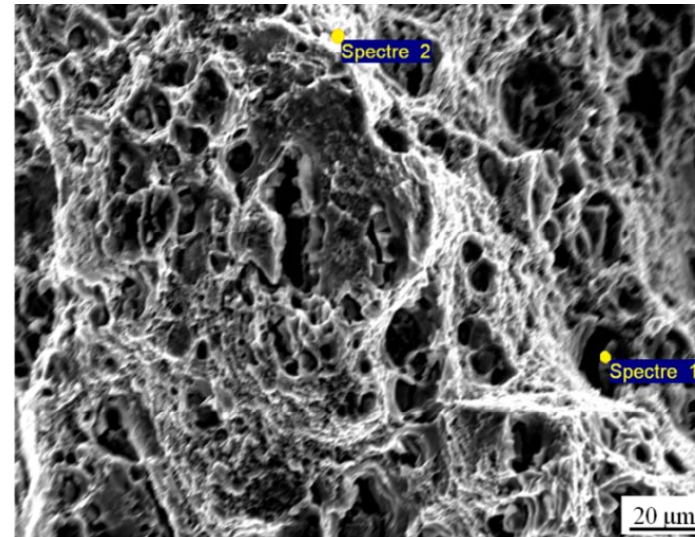
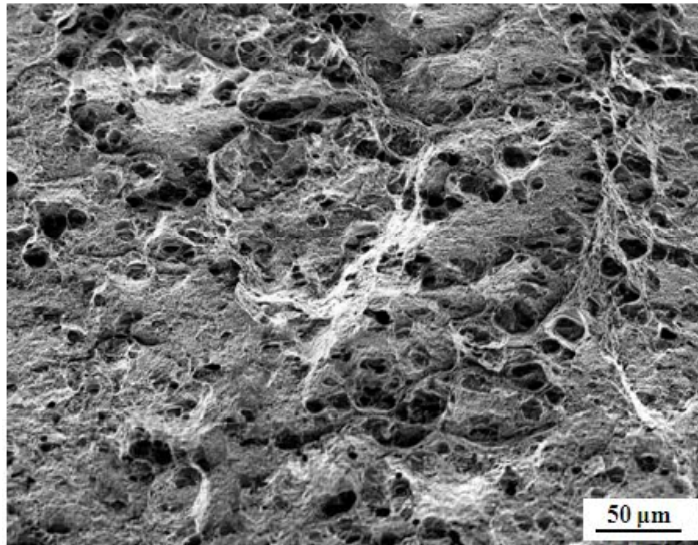
Rupture à la frontière Noyau/ZATM



Faciès non plan orientés à 45°



Influence de l'écoulement sur la rupture



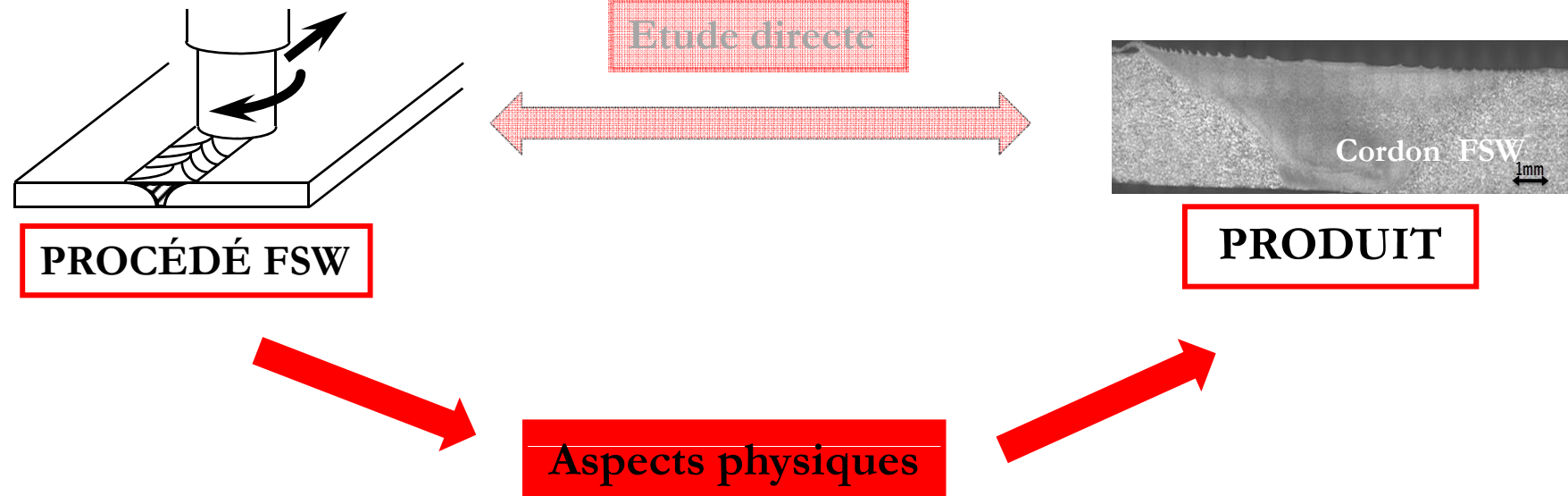
Faciès de rupture issus de l'essai de traction

- Rupture ductile
 - Cupule de taille entre 3 et 10µm, riches en cuivre
 - Amorçage de la rupture non identifié

Conclusion

Les caractéristiques métallurgiques et mécaniques du cordon FSW sont l'image des phénomènes physiques de l'interaction outil/matière lors du soudage.

- Ecoulement de la matière
- Echange thermique

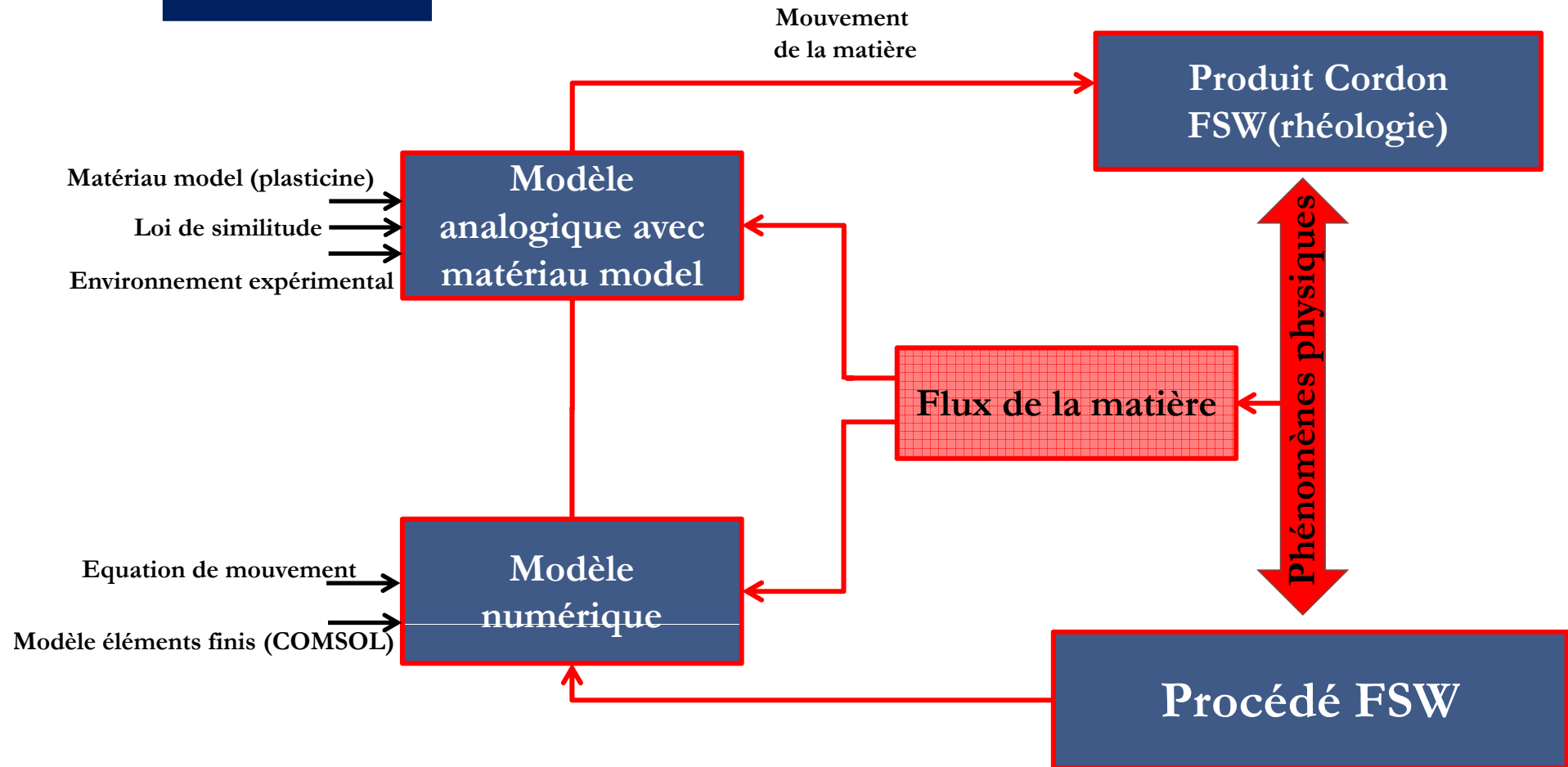


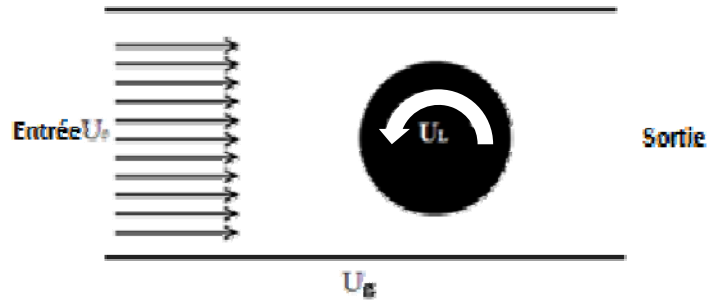
II-ÉCOULEMENT DE LA MATIÈRE

Objectifs

Comprendre les mouvements de la matière autour du pion aboutissant à la rhéologie du cordon FSW

DÉMARCHE





viscosité dynamique	$2.17 \cdot 10^7$
densité du fluide	1718
Vitesse de l'écoulement	20[mm/min]
Vitesse de rotation	800[tr/min]
Vitesse à la frontière	$U_g=0$

Equation de mouvement

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = \nu \Delta u - \frac{1}{\rho} \nabla(p) + f$$

u vecteur vitesse [m/s]

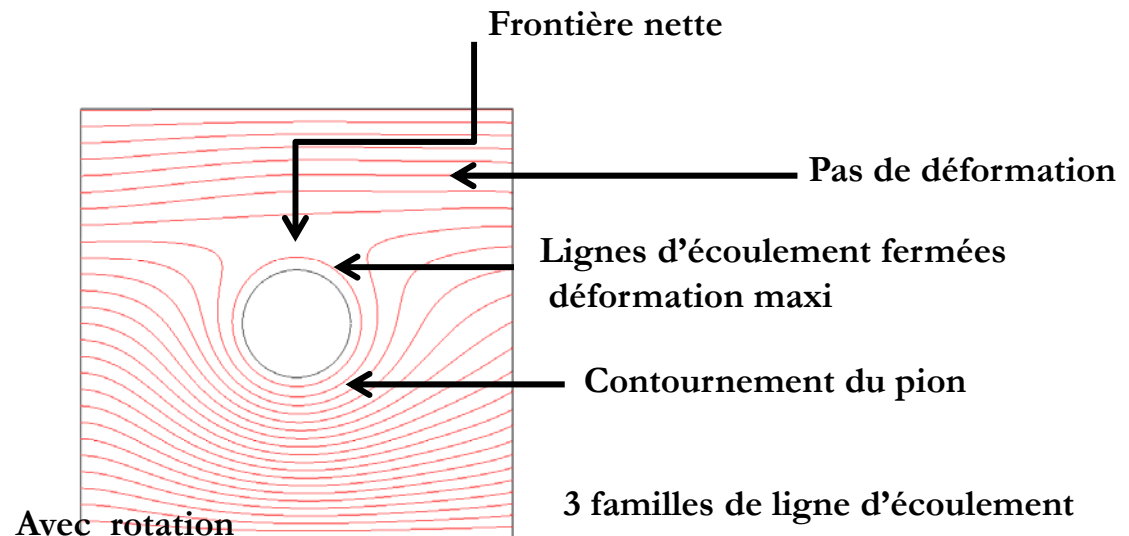
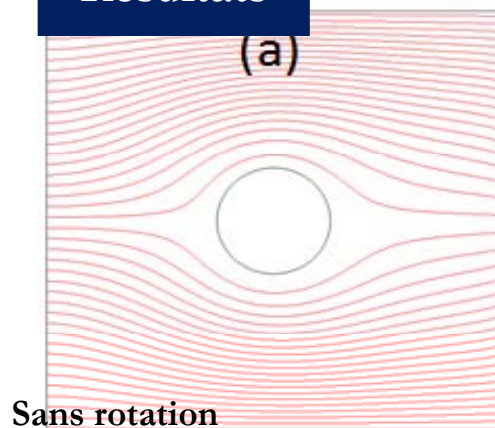
ν viscosité dynamique [Pa.s]

ρ densité du fluide [kg/m³]

p pression [Pa]

f efforts volumiques [N/m³]

Résultats



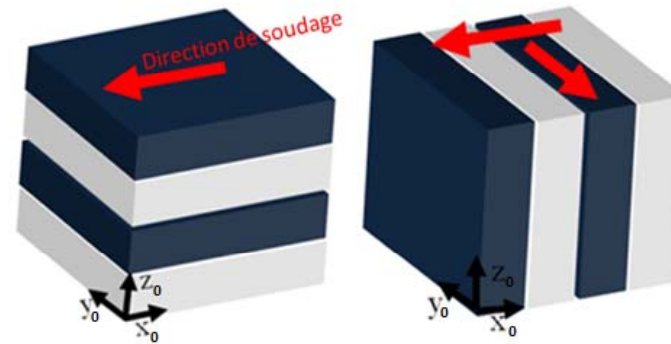
Choix du matériau model

Plasticine :

Différentes couleurs : facilite la visualisation des mouvements

Différents mode d'empilement

Facilité de travail



Différentes modes d'empilement et directions de soudage.

Préparation des feuilles de plasticine de 2 à 3 mm avec laminoir

F. Gratecap. Contributions au procédé de soudage par frottement et malaxage FSW. Ph.D thesis, École Centrale de Nantes, France, 2007

B.C. Liechty, B.W. Webb. The use of plasticine as an analog to explore material flow in friction stir welding. Journal of Materials Processing Technology, 184, 2007, pp. 240–250.

Outillage



Outillage pour essai en plasticine

théorème de Vashy-Buckingham

Similitude géométrique

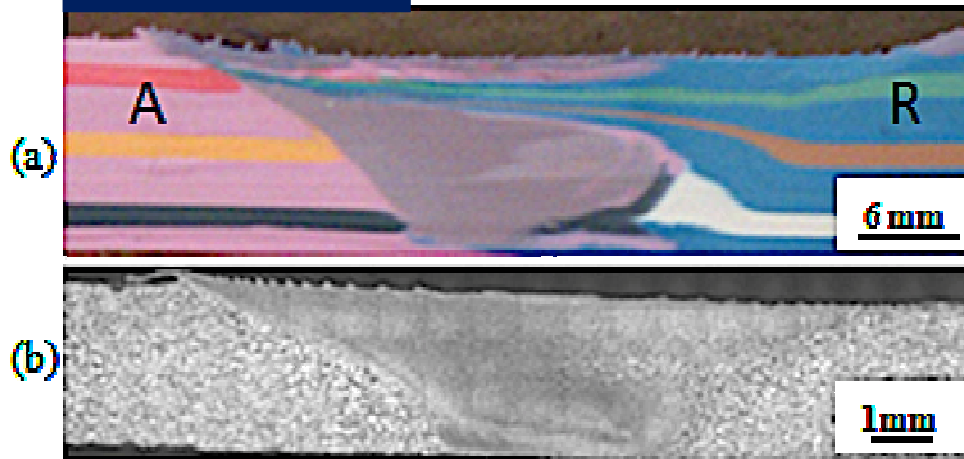
$$k_d = \frac{d_2}{d_1}$$

Similitude cinématique

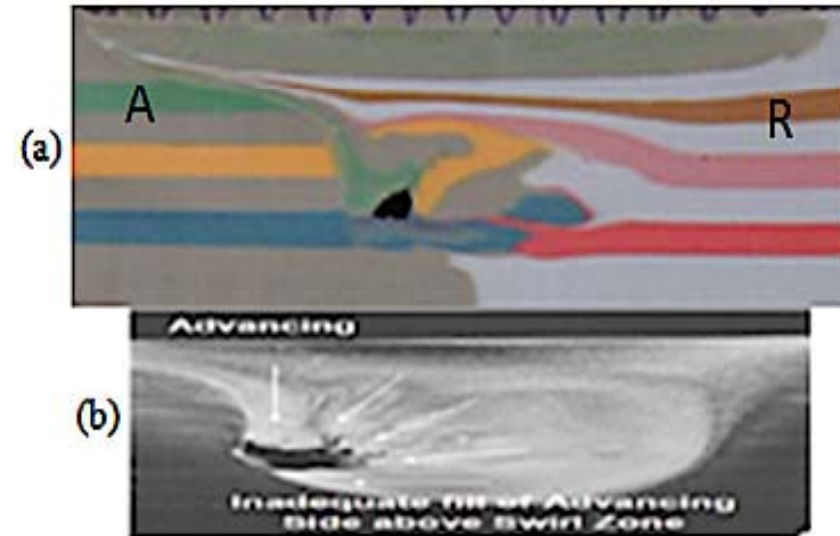
$$k_v = \frac{V_2}{V_1}$$

$$V_m = V_r \cdot \left(\frac{\rho_r}{\rho_m} \right) \cdot \left(\frac{D_r}{D_m} \right) \cdot \left(\frac{v_m}{v_r} \right)$$
$$N_m = V_m \cdot \left(\frac{N_r \cdot D_r}{V_r \cdot D_m} \right)$$

Résultats

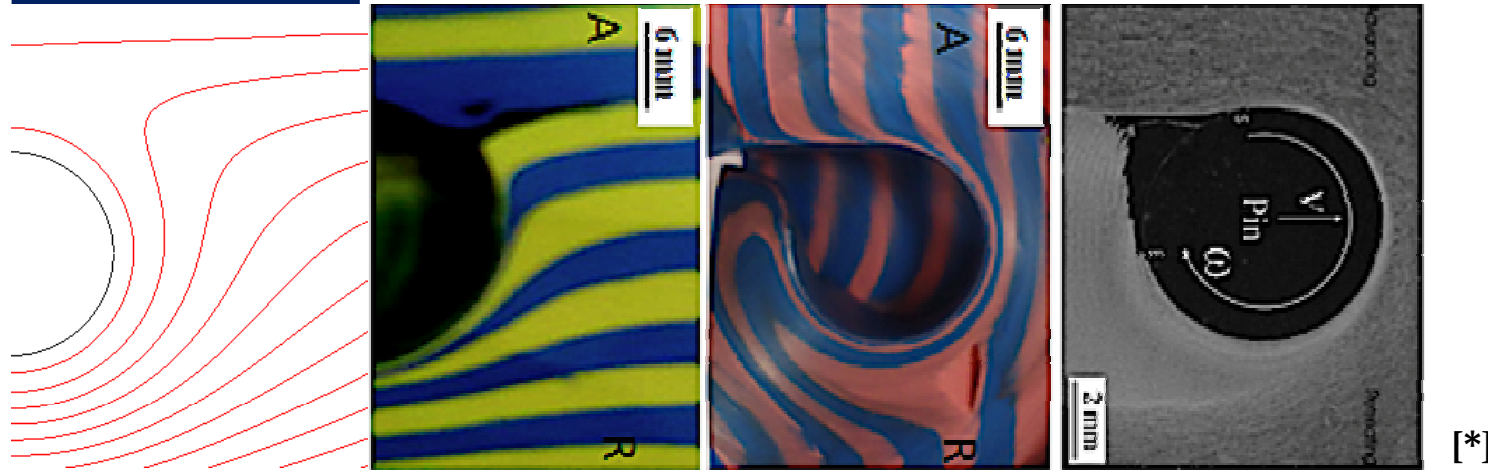


Coupe transversale de la plasticine



- Bonne corrélation morphologie cordon Aluminium/Plasticine
- Après passage de l'outil : la matière du CA contourne l'outil
la matière du CR est juste poussé vers l'arrière
- Présence des défauts pour des hautes vitesses d'avance

Résultats



Coupe en épaisseur : Visualisation de l'écoulement autour du pion. (STOP ACTION)

- Bonne corrélation de l'écoulement au cours du soudage
- Bonne représentation du modèle numérique 2D de l'écoulement laminaire
- Empilement des couches de matière derrière l'outil : formation du *onion rings* *

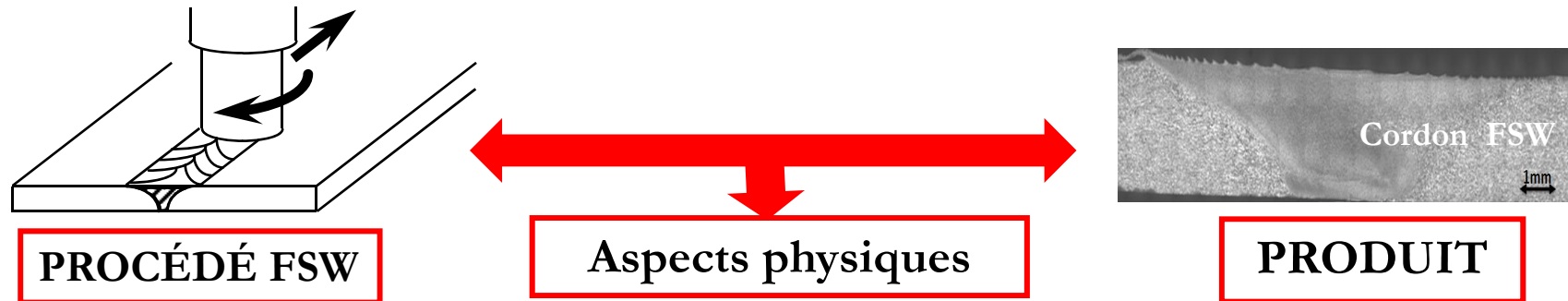
* K.N. Krishnan. On the formation of onion rings in friction stir welds, Mat. Sci. and Eng. A, Vol. 327, 2002, pp. 246-251.

Conclusion

Modèle analogique : outil qui permet de visualiser globalement les écoulements

mais difficulté pour prévoir les déformations engendrées lors du soudage :

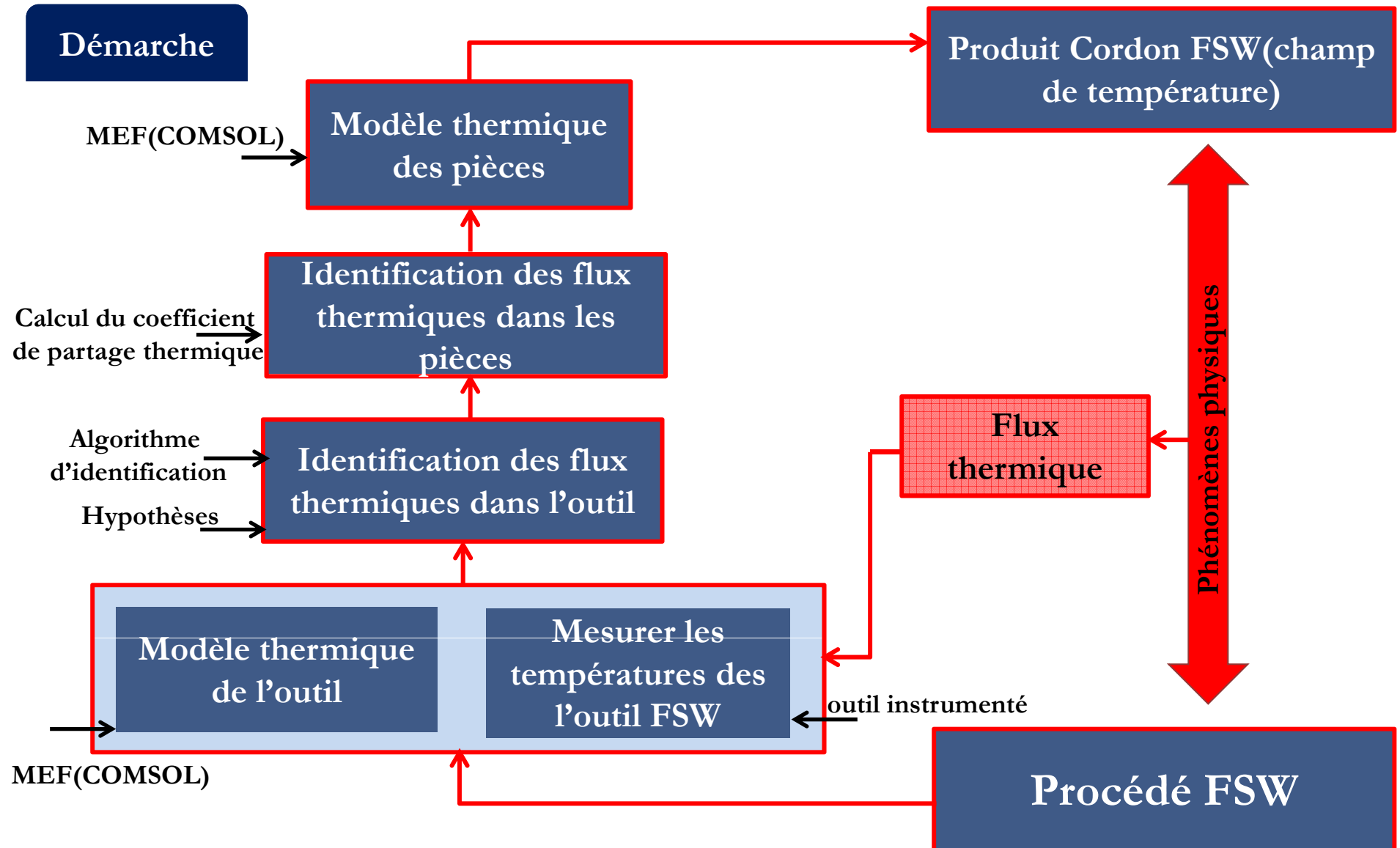
homogénéité de la plasticine lors du soudage Idem pour le modèle numérique



III- APPROCHE THERMIQUE

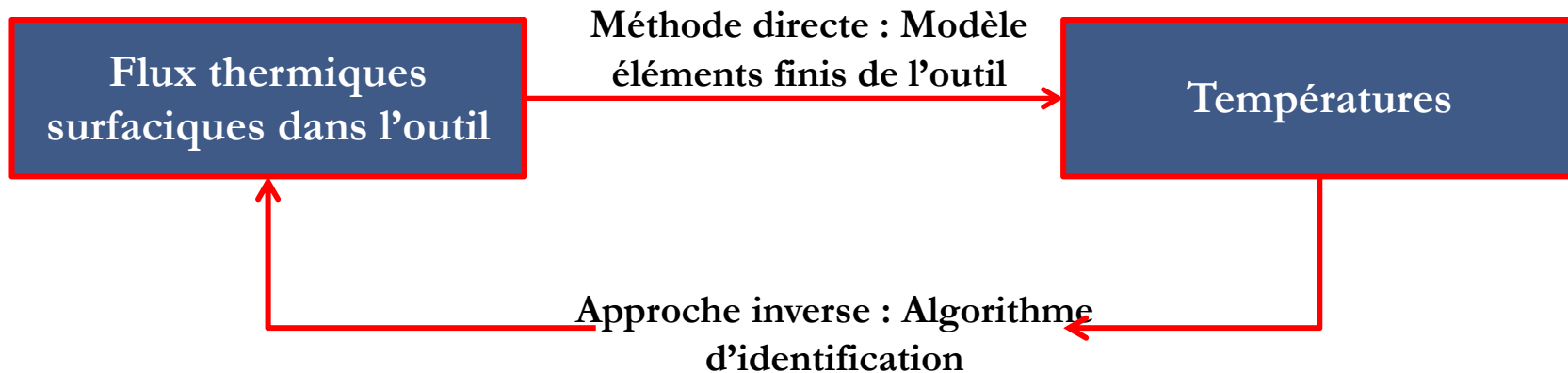
Objectifs

Contribuer à la compréhension des échanges thermiques outil/matière
Evaluer les champs thermiques dans les pièces à souder.

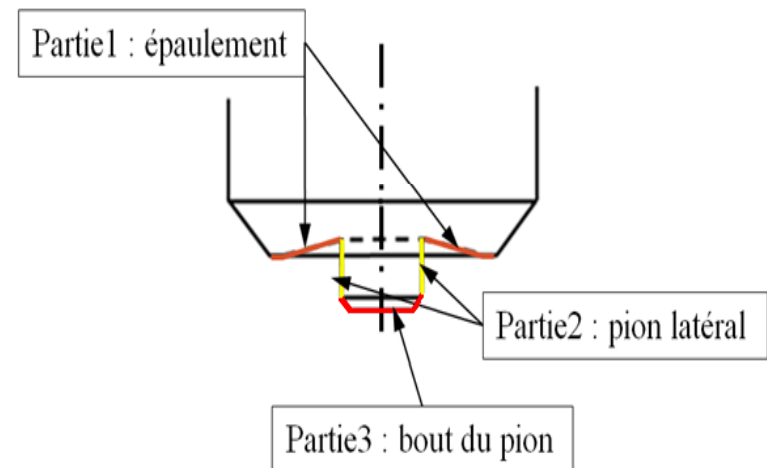
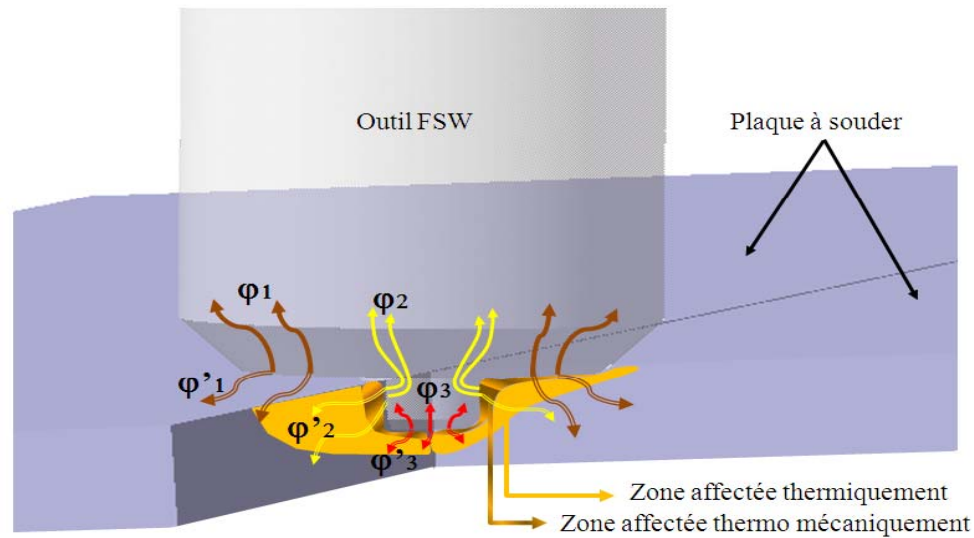


Principe

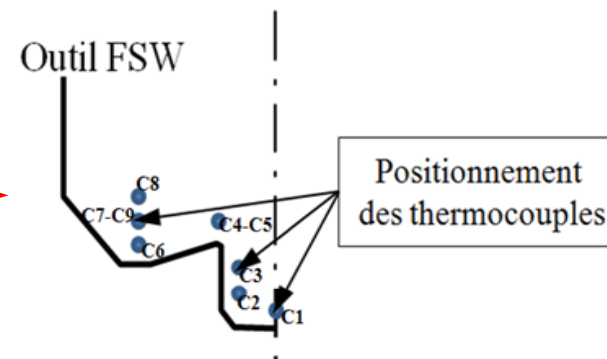
Estimer l'évolution du flux de chaleur surfacique à partir de la mesure de la température

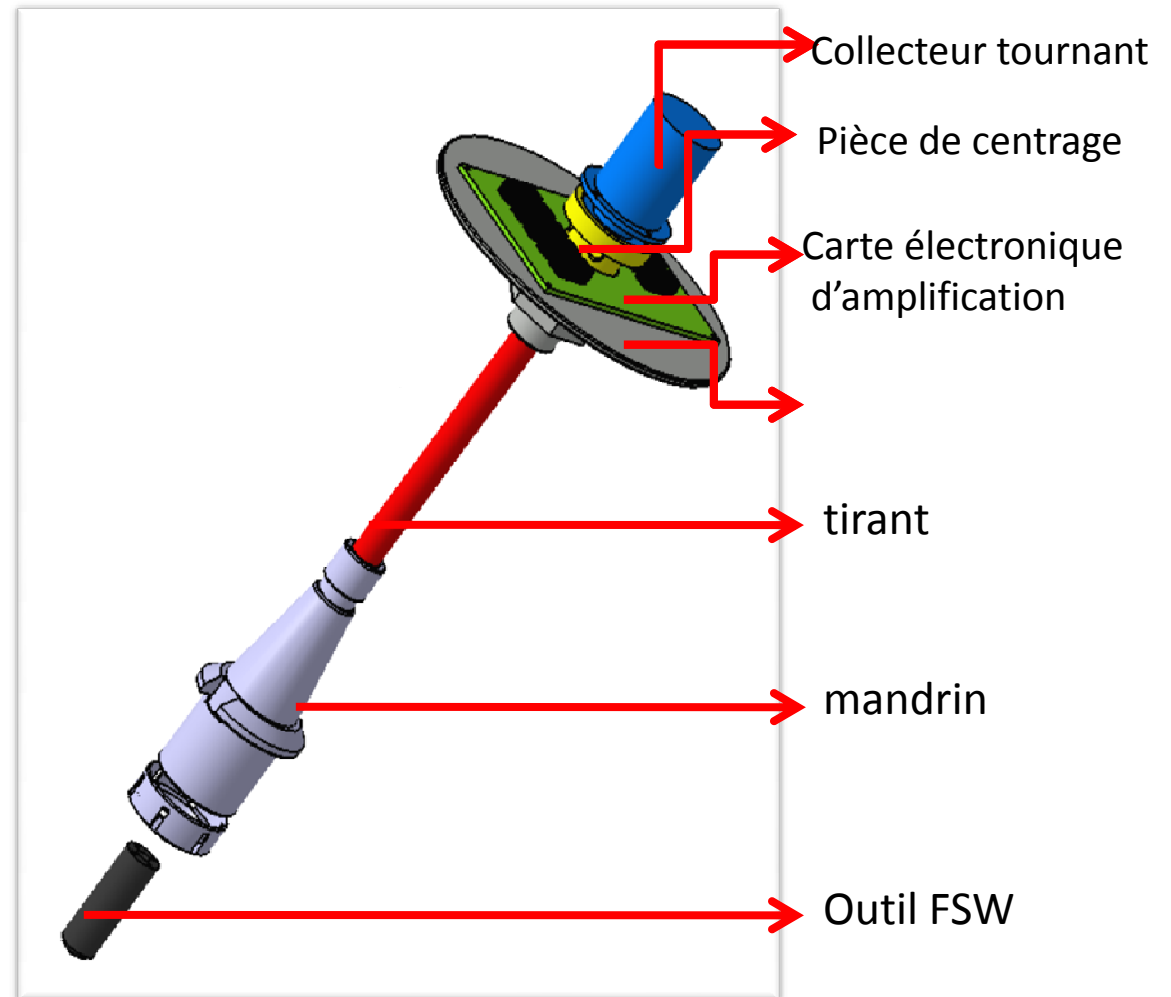
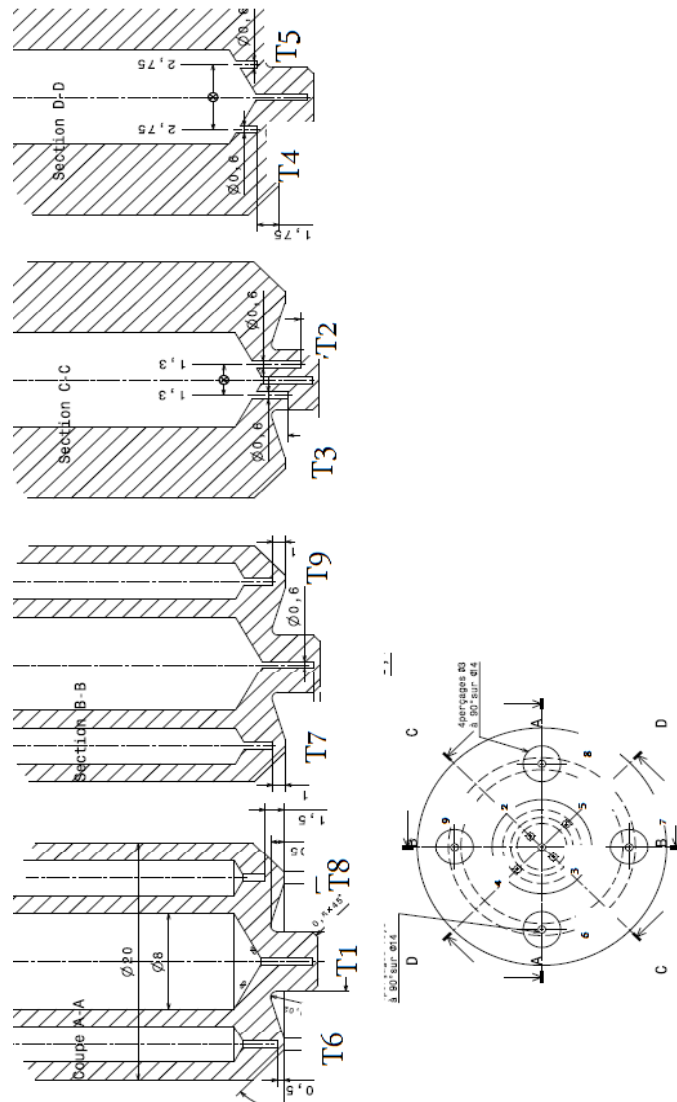


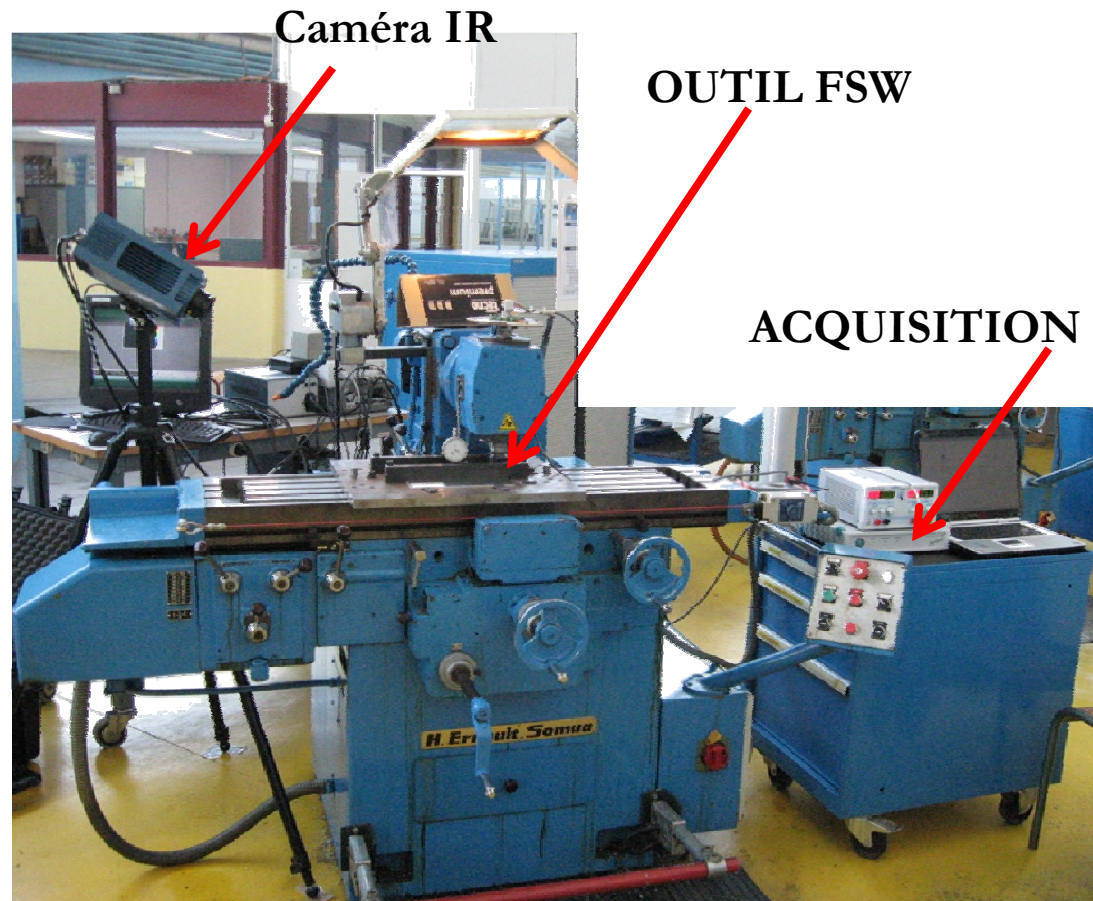
Hypothèse



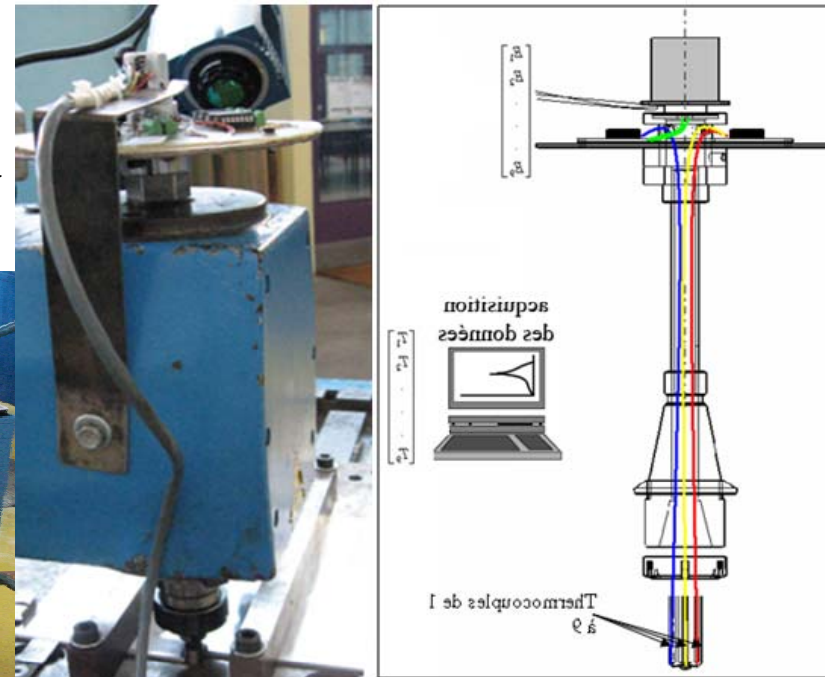
zone d'échange thermique du
 couple outil/matière

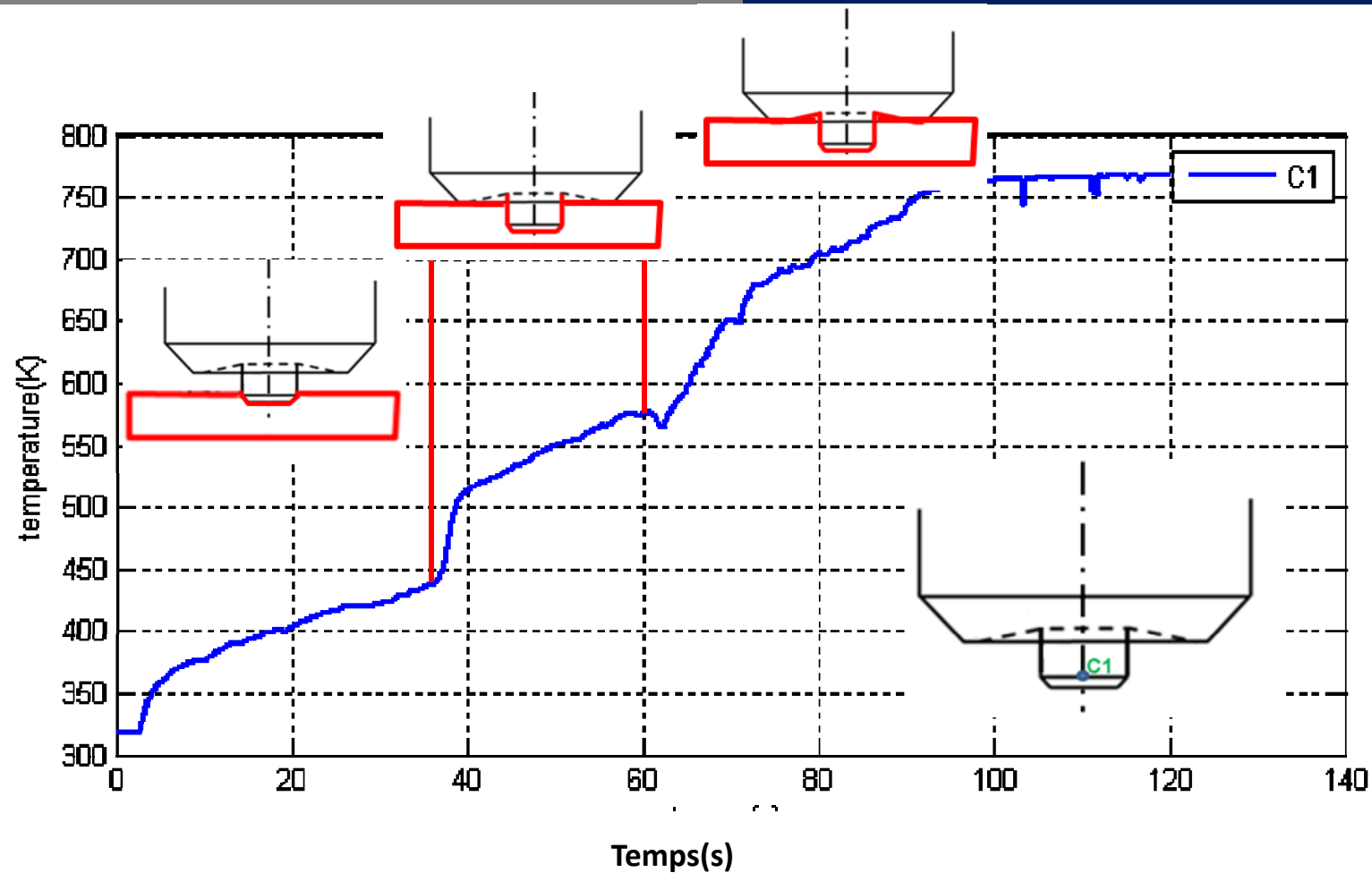




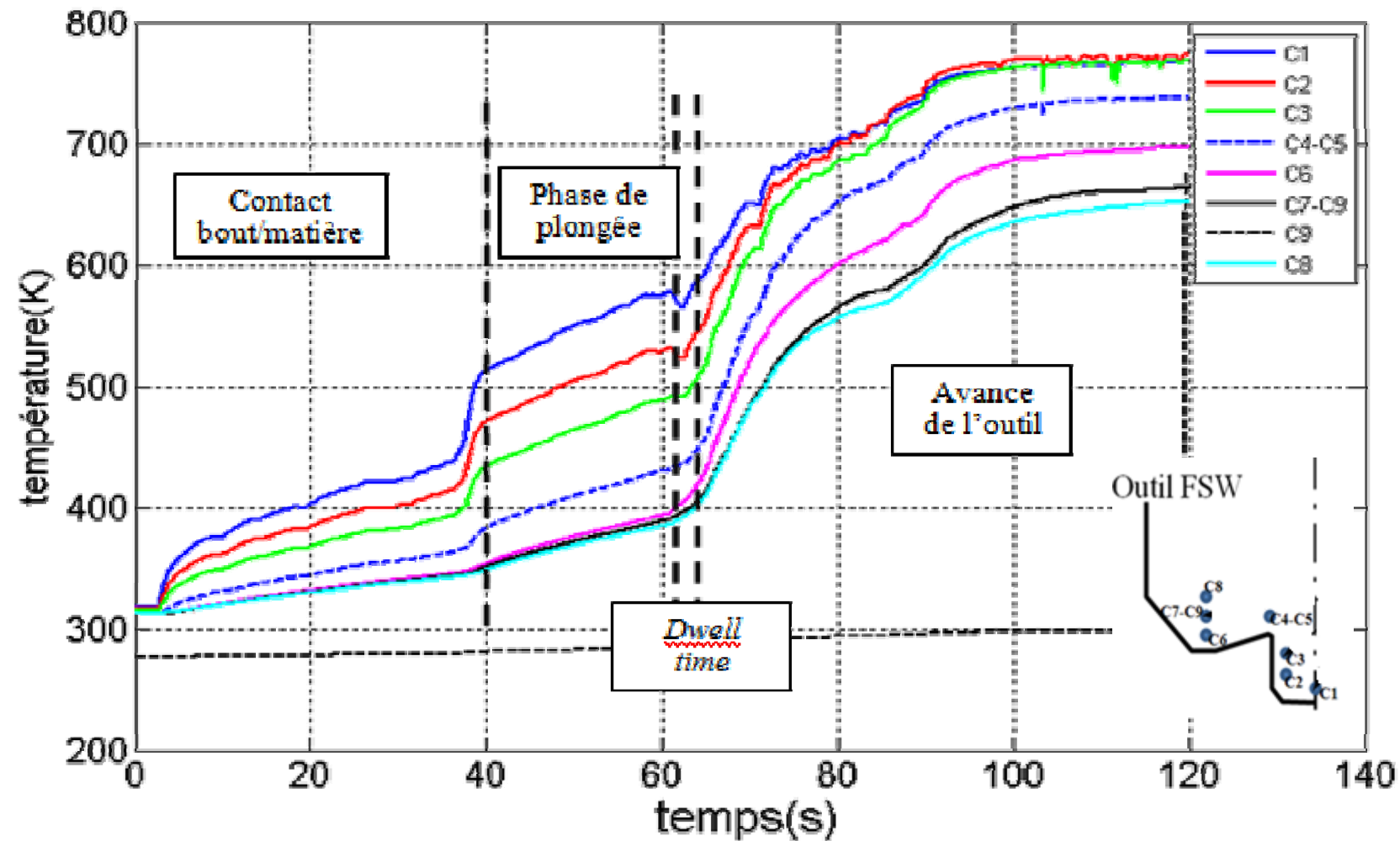


Essai thermique: dispositif expérimental

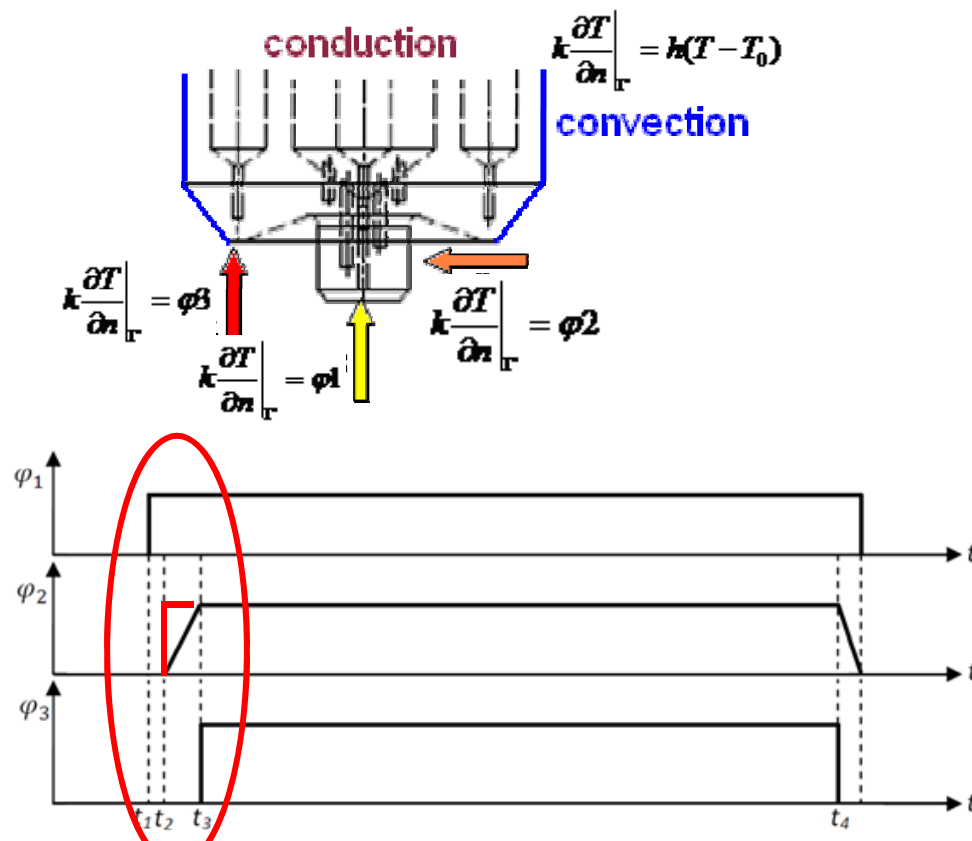




Évolutions de la température aux cours des différentes étapes

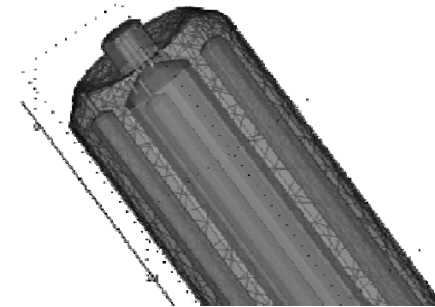


Hypothèses



Évolutions des flux aux cours des différentes étapes

Modèle numérique

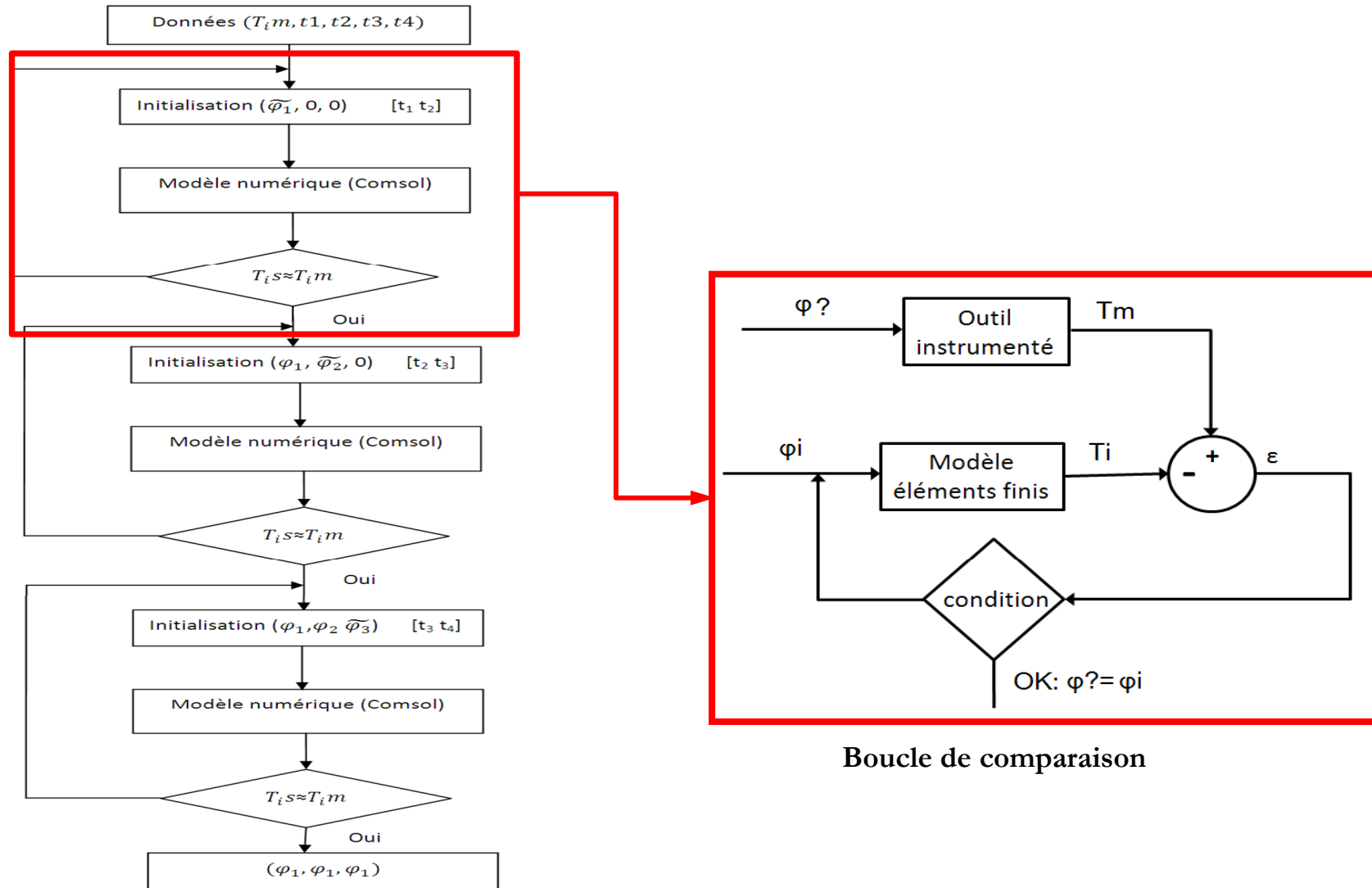


Maillage volumique : COMSOL

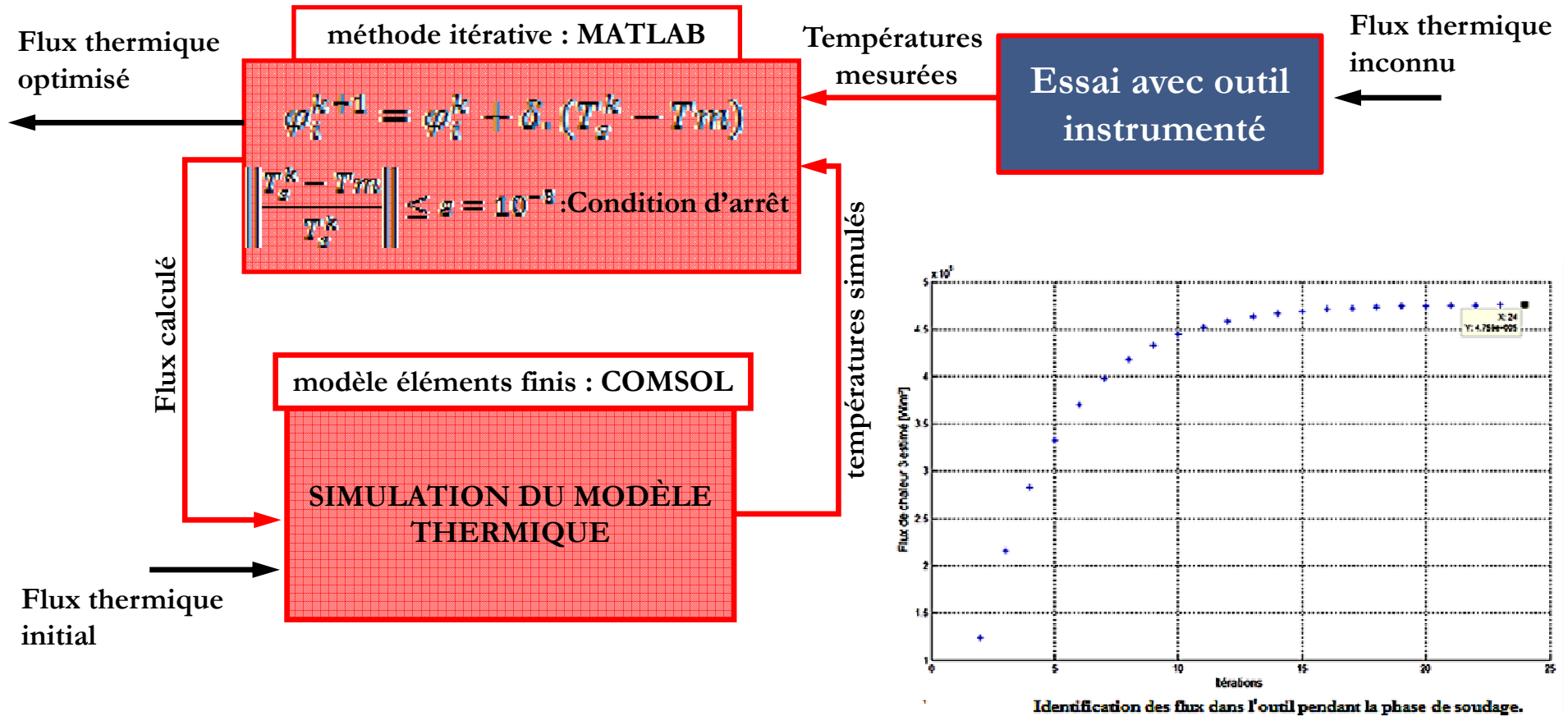
Équation de transfert thermique

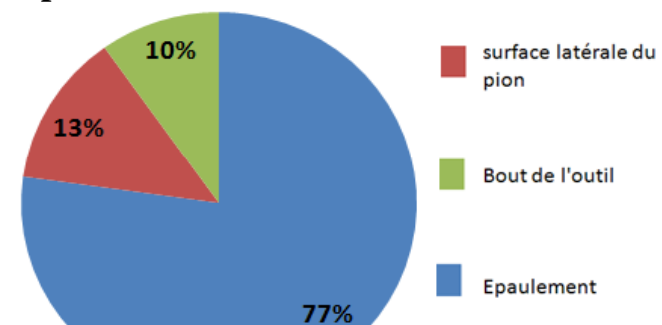
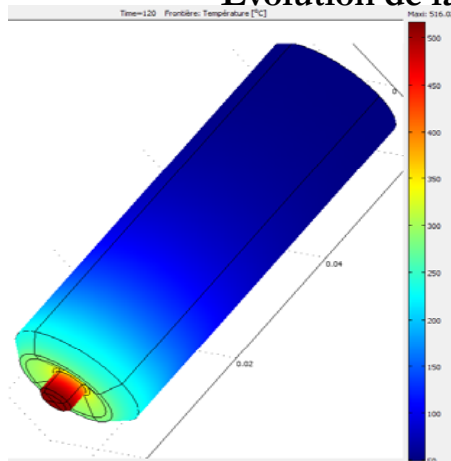
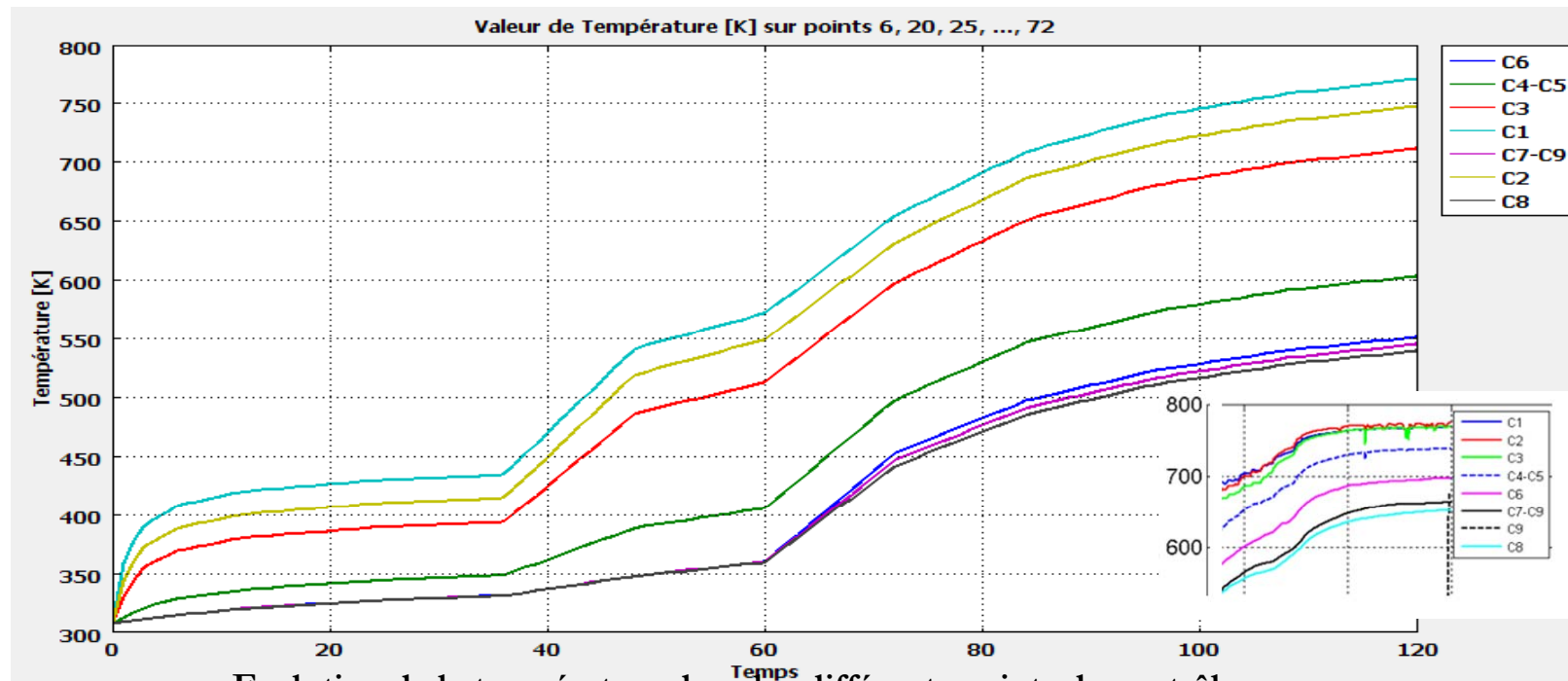
$$\nabla \cdot (-k \nabla T) = Q - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Caractéristique thermique de l'outil		
Masse volumique	Capacité thermique	Conductivité thermique
$\rho = 7800 \text{ kg.m}^{-3}$	$C = 460 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$k = 24.4 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$



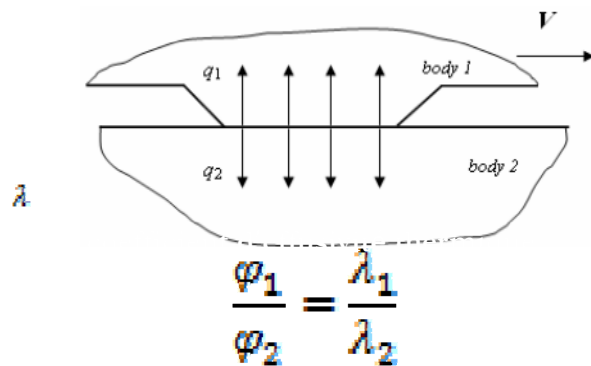
Représentation schématique de l'algorithme récurrent pour l'évaluation des flux dans l'outil FSW.





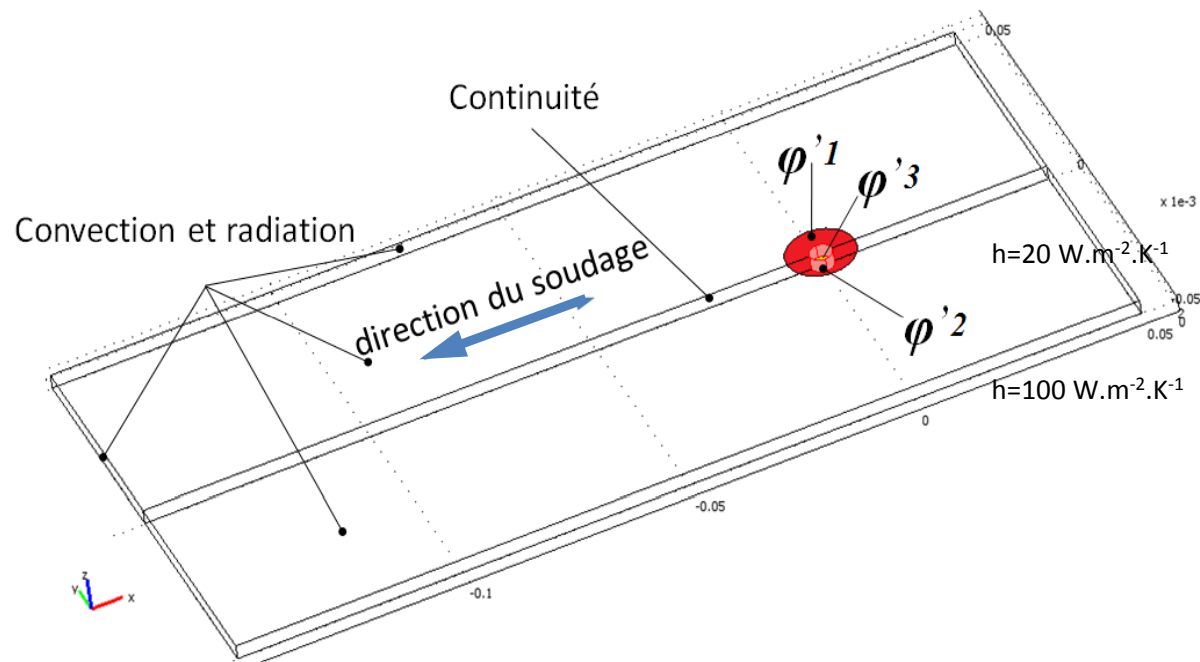
Pourcentage de l'apport du flux thermique pour les différentes zones de l'outil

Modèle éléments finis



$$\lambda = \sqrt{\rho C_p k}$$

effusivité thermique



$$\nabla \cdot (-\nabla T) = Q - \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T$$

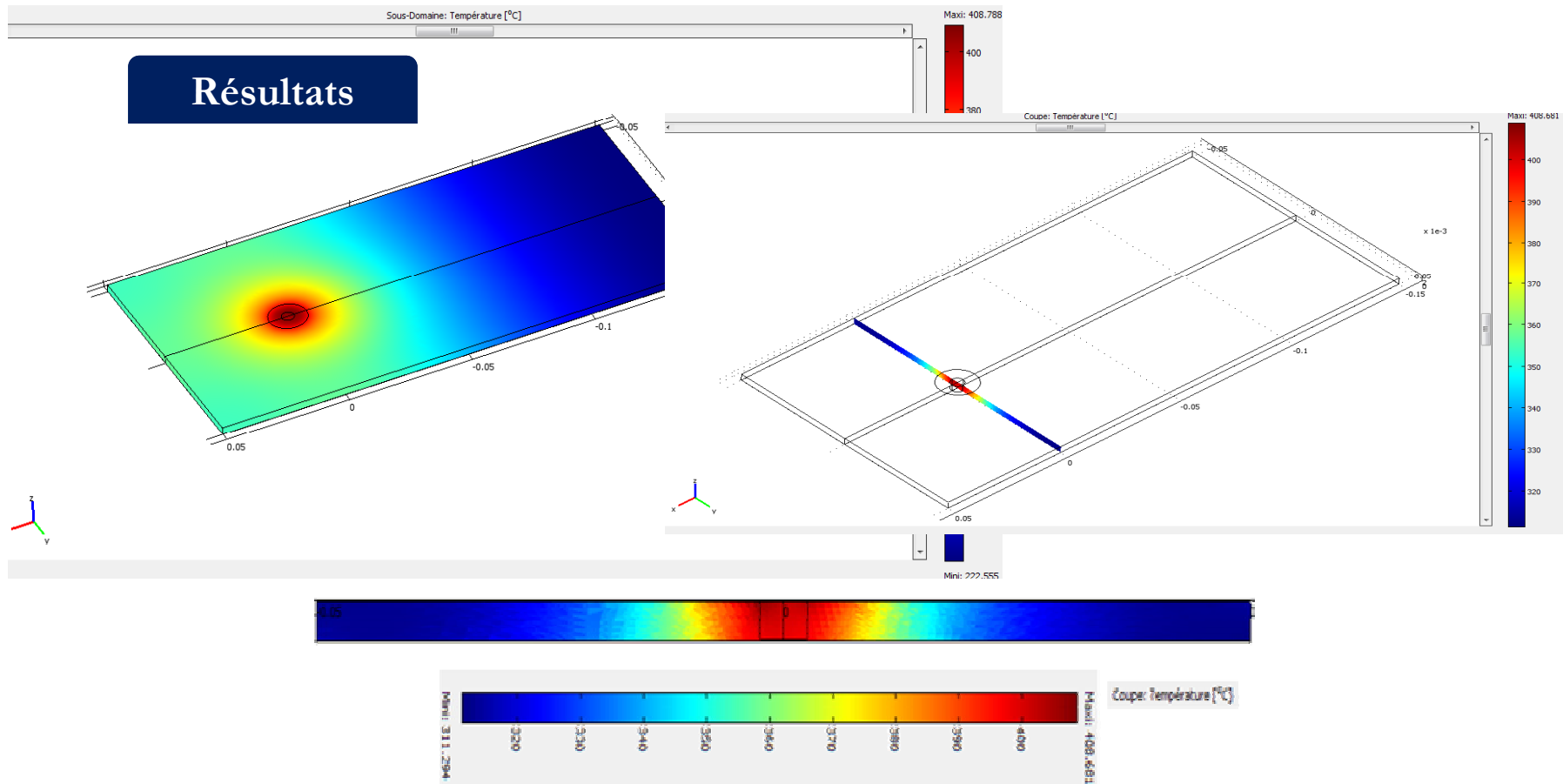
Densité de flux thermique imposée ϕ_i :

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = \phi_i$$

Le mode de transfert par convection est présenté par l'équation suivante

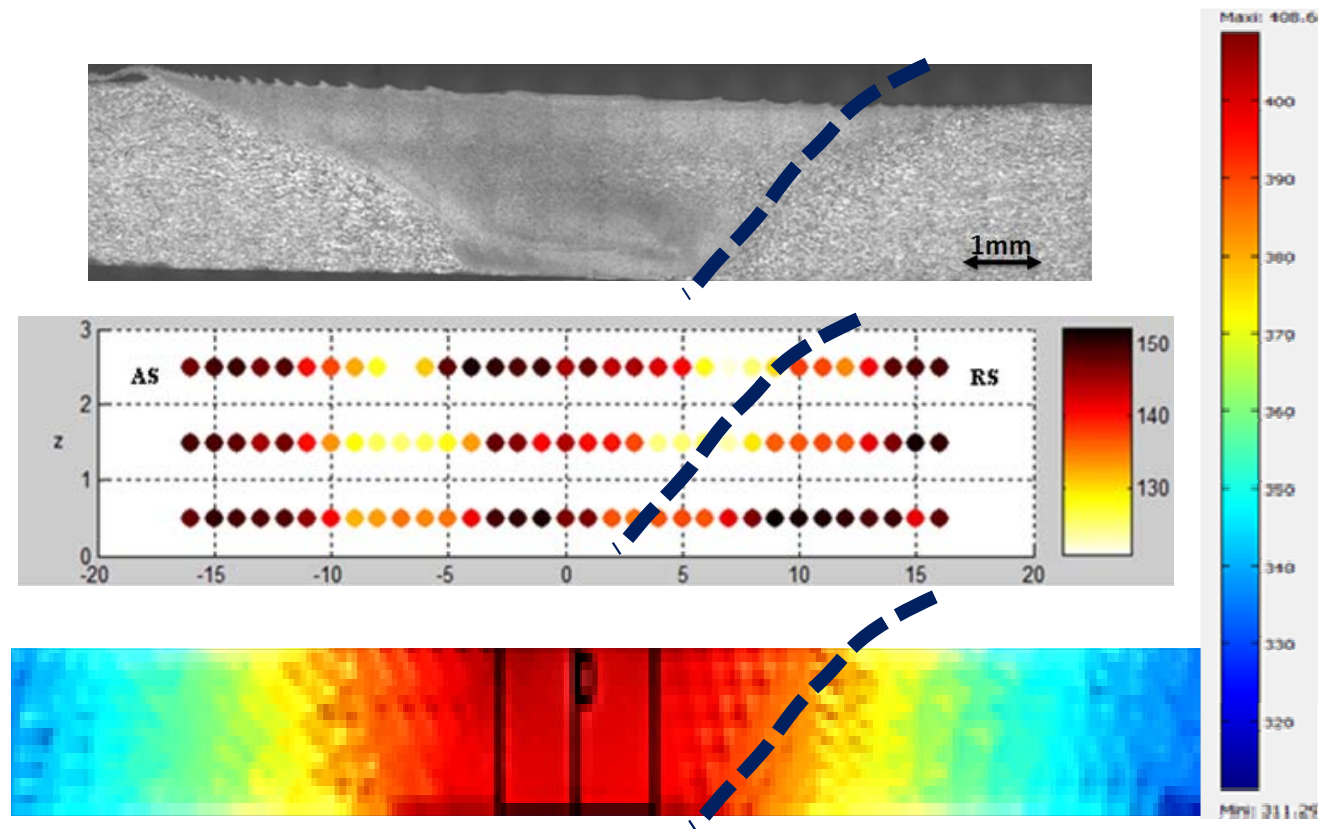
$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{amb})$$

Résultats



champ de température dans les pièces à souder.

- Température de soudage inférieure à la température de fusion
- Un gradient de température de la forme du cordon



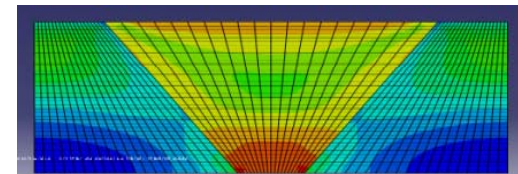
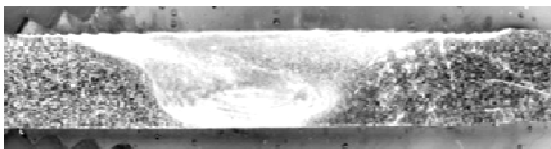
La position de la rupture est située dans la zone la plus chaude hors la zone malaxée par l'outil

Chute de la qualité du cordon liée à la fois à la thermique et l'écoulement

Conclusions

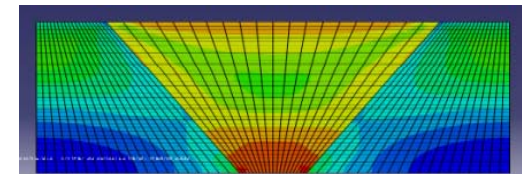
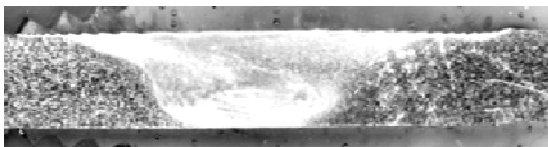
Contribuer à la compréhension des phénomènes physiques lors du soudage :

- Etudier l'aspect énergétique du procédé
 - Evaluer la puissance mécanique
 - Quantifier l'échange thermique entre l'outil et les pièces à souder :
 - *Méthode d'identification de la répartition des flux thermiques dans l'outil
 - *Modèle thermique des pièces à souder
 - Etudier les écoulements autour de l'outil :
 - Modèle 2D d'écoulement de matière
 - Technique expérimentale de visualisation des écoulements autour de l'outil de
- Modèle analogique
- Réaliser une étude paramétrique de la tenue mécanique du cordon.



Perspectives

- Aspect énergétique
 - Déterminer les facteurs de l'aspect énergétique et compléter le bilan énergétique
 - Développer un environnement expérimental plus performant (mesure des efforts et de la l'évolution de la température simultanément).
 - Effectuer des essais thermiques avec un outil sans épaulement pour affiner les résultats de la méthode de l'identification
- Ecoulement de matière
 - Améliorer le modèle analogique avec des critères de similitude plus exigeants
 - Visualisation des flux de matière en temps réel : choix d'un autre matériau modèle
- Elargir le domaine de l'étude paramétriques.



*Merci pour votre
attention*